

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Meranie viskozity

Viscosity measurement

Študent:

Roman Rafaj

Vedúci bakalárskej práce:

Ing. Jana Jablonská, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Roman Rafaj**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**
Téma: **Měření viskozity**
Viscosity Measurement

Zásady pro vypracování:

Proveďte měření viskozity dodaných vzorků v závislosti na teplotě.

1. Vypracujte přehled měření viskozity.
2. Změřte viskozity dodaných vzorků v závislosti na teplotě.
3. Vyhodnoťte měření v souvislostech známých parametrů (např. v závislosti na opotřebení kapaliny, stáří kapaliny, hustoty).
4. Vytvořte návody pro měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

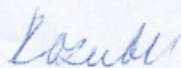
- [1] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha. SNTL Praha, 1987. 354 s.
- [2] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. VŠB-TU Ostrava, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.
- [3] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
- [4] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření*, VŠB-TU Ostrava, 2010. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>.
- [5] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin*, VŠB-TU Ostrava, 2010. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>.
- [6] ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [7] ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Jablonská, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Miesto prisazne prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.


V Ostrave 20.5.2013

Rafaj
Podpis študenta

Prehlasujem, že

- som bol oboznámený s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č 121/2000 Z. z., autorský zákon, najmä § 35 - použitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školských predstavení a použitie diela školského a § 60 - školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola banská - Technická univerzita Ostrava (ďalej len "VŠB-TUO") má právo nezárobkovo k svojej vnútornej potrebe bakalársku prácu užiť (§ 35 ods. 3).
- súhlasím s tým, že bakalárska práca bude v elektronickej podobe uložená v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k nahliadnutiu a jeden výťah bude uložený u vedúceho bakalárskej práce. Súhlasím s tým, že údaje o kvalifikačnej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo dohodnuté, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu § 12 ods. 4 autorského zákona.
- bolo dohodnuté, že použiť svoje dielo - bakalársku prácu alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č 111/1998 Z. z., O vysokých školách a o zmene a doplnení niektorých zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave: 20.5.2013


.....
Podpis

Meno a priezvisko autora práce:

Rafaj Roman

Adresa trvalého pobytu autora práce:

U Matuška 138, 023 51 Raková

ANOTÁCIA BAKALÁRSKEJ PRÁCE

RAFAJ,R. Meranie viskozity : Bakalárska práca. Ostrava : VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydrodynamiky a hydraulických zariadení, 2013, 56 strán, Vedúci práce: Jablonská,J.

Bakalárska práca sa zaoberá meraním viskozity zadaných vzoriek v závislosti na teplote. Obsahuje prehľad rozdelenia kvapalín na Newtonovské a Nenewtonovské prístroje pre meranie viskozity. Obsahom práce je návod k obsluhu meracieho prístroja a postupu merania. Pre praktické použitie je veľmi dôležité poznať závislosti viskozity na teplote a tlaku, ale aj na ďalších parametroch ako je opotrebenie. V práci je vyhodnotenie závislosti viskozity na teplote pre rôzne vzorky, ktoré poskytol zadávateľ.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

RAFAJ,R. *Viscosity Measurement:bachelor thesis*. Ostrava:VŠB- Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipments, 2013, 56 p.Thesis head: Jablonská,J.

Work deals with the measurement of viscosity given samples depending on the temperature. Summarizes the distribution of Newtonian fluids and non-Newtonian device for measuring the viscosity. The content of this work is the operation manual measuring apparatus and measurement procedure. For practical use is very important to know dependence between viscosity on temperature and pressure, but also on other parameters such as wear. The work is to evaluate the dependence of viscosity on temperature for different samples provided by the sponsor.

Chcel by som poďakovať vedúcej svojej práce, pani ing. Jane Jablonskej, Ph.D. za pomoc pri spracovaní a čas, ktorý mi venovala. Zároveň chcem poďakovať Arnoštovi Sitekovi za pomoc pri meraní.

Obsah

1. Úvod	11
2. Prehľad merania viskozity	12
2.1. Viskozita	12
2.2. Dynamická viskozita	13
2.3. Kinematická viskozita	13
2.4. Newtonovské kvapaliny	14
2.5. Nenewtonovské kvapaliny	14
2.6. Spôsoby merania viskozity	18
2.7. Opatrenie kvapalín	25
3. Meranie vzoriek a ich závislosť na teplote	28
3.1. Meracie zariadenie	28
3.2. Postup merania	30
3.3. Program B.E.A.V.I.S.	32
3.4. Závislosť nameraných vzoriek na teplote podľa hustoty	34
3.5. Závislosť vzoriek na teplote	35
4. Meranie v závislosti na iných parametroch	37
Vyhodnotenie merania na iných parametroch	37
4.1. Závislosť na gradientu rýchlosti	37
4.2. Závislosť na otáčkach	38
5. Návod pre meranie	41
6. Záver	43
7. Zoznam použitej literatúry	44
8. Zoznam príloh	46

Zoznam použitých značiek a symbolov

Značka	Názov veličiny	Jednotka
α	Uhol	[rad]
Δp	Tlaková strata	[Pa]
η	Dynamická viskozita	[Pa · s]
η_a	Zdanlivá viskozita	[Pa · s]
η_0	Dynamická viskozita pri teplote T_0	[Pa · s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² · s ⁻¹]
ρ	Hustota	[kg · m ⁻³]
ρ_k	Hustota guľičky	[kg · m ⁻³]
ρ_v	Hustota meranej kvapaliny	[kg · m ⁻³]
τ	Šmykové napätie	[Pa]
τ_p	Počiatkové šmykové napätie	[Pa]
ω	Uhlová rýchlosť	[rad · s ⁻¹]
a	Konštanta závislá na druhu pracovnej kvapaliny	[K ⁻¹]
b	Konštanta závislá na druhu pracovnej kvapaliny a jej teplote	[Pa ⁻¹]
g	Gravitačné zrýchlenie	[m · s ⁻²]
h	Hĺbka ponorenia valca	[m]
$\frac{dv}{dx} = j$	Gradient rýchlosti	[s ⁻¹]
k	Konštanta viskozimetra	
K	Koeficient konzistencie	[Pa · s]
L	Dĺžka	[m]
M	Moment sily	[N · m]
n	Index toku	[1]
Q	Objemový prietok	[m ³ · s ⁻¹]
r	Polomer	[m]
r_1	Polomer vonkajšieho valca	[m]
r_2	Polomer vnútorného valca	[m]
t_p	Doba výtoku meranej kvapaliny	[s]
t_v	Doba výtoku vody	[s]
T	Teplota	[K]

T_0

Počiatočná teplota

[K]

1. Úvod

Hlavným cieľom bakalárskej práce je zistiť závislosť viskozity vzoriek na teplote, ktoré sú namiešané z vody, grafitu, zahusťovadla a čpavku. Pre dané vzorky sme viskozitu zmerali pomocou rotačného reometra typu válec-válec s Couettovým prúdením. Podľa tokovej krivky som určil, že sa jedna o Newtonovskú kvapalinu a určil som závislosť na teplote, ktorú som porovnal s vypočítanými hodnotami. Vypočítané hodnoty som určil pomocou uhlu naklonenia tokových kriviek z nameraných hodnôt.

Namiešané vzorky mali 3 rozdielne hustoty. Zmes grafitu sa pridáva pre jeho dobre mazacie vlastnosti, ktoré zabezpečujú dobre šmykové napätie pri ťahaní drátu. Voda sa používa pre jej riedkosť, a tým zabezpečuje dobre a rýchle mazanie.

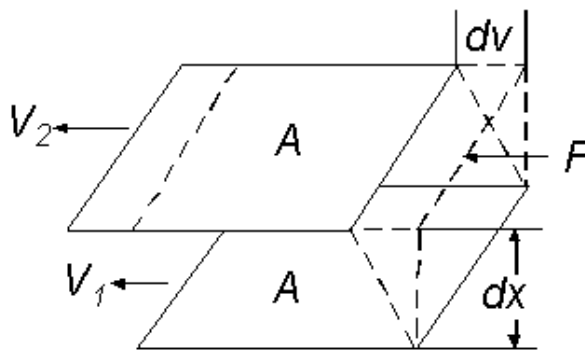
Z nameraných hodnôt sme určili závislosť viskozity na teplote. Zmena viskozity vzorky, má vplyv na mazacie účinky.

Meranie sme prevádzali na rotačnom reometri a pred každým meraním som ho vynuloval. Pre každé meranie sme do nádoby naliali 8mm^3 kvapaliny. Pre meranie som nastavil v programe B.E.A.V.I.S. parametre merania a následne začal merať všetkých 12 vzoriek. Po ich nameraní som ich grafický upravil v programe Excel a vykreslil viacero závislostí.

2. Prehľad merania viskozity

2.1. Viskozita

Viskozita je miera vnútorného trenia kvapaliny a závisí predovšetkým na silách medzi časticami. Toto trenie sa prejavuje vtedy, keď sa pohybuje vrstva kvapaliny vzhľadom k inej vrstve kvapaliny. Medzi týmito vrstvami, ktoré sa pohybujú rôznou rýchlosťou vzniká šmykové napätie [obr.1]. Šmykové napätie vzniká pri každom pohybe kvapaliny[1, 2, 5, 7].



Obr.1 Vzájomné pôsobenie dvoch vrstiev na seba v závislosti na gradientu rýchlosti[7]

Šmykové napätie určíme podľa vzťahu (1).

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx} = \eta \cdot j \quad [Pa] \quad (1)$$

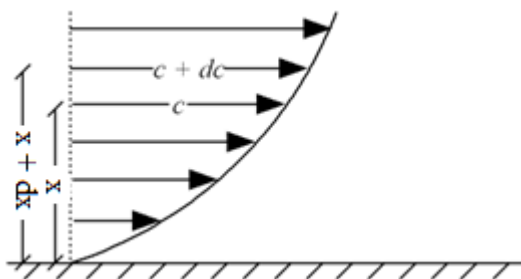
Gradient rýchlosti $\frac{dv}{dx} = j$ je miera zmeny, pri ktorej sa susedné vrstvy pohybujú navzájom k sebe.

Podľa Newtonovho zákona je šmykové napätie lineárne úmerne gradientu rýchlosti vo smere kolmom na pohyb kvapaliny [Obr.3]. Newtonov zákon platí len pre Newtonovské kvapaliny a pri laminárnom prúdení. Podľa Newtonovho zákona môžeme vypočítať dynamickú viskozitu pre Newtonovské kvapaliny vzťahom(2)[1, 2, 3, 5, 7].

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dx}} \quad [Pa \cdot s] \quad (2)$$

2.2. Dynamická viskozita

Je to absolútna viskozita alebo aj inak povedané koeficient absolútnej viskozity a je meradlom vnútorného odporu kvapaliny. Presnejšie povedané je dynamická viskozita tangenciálne pôsobiaca sila na jednotku plochy, potrebná pre pohyb o jednu horizontálnu rovinu (2). Do úvahy sa musí zohľadniť aj rýchlosť, ktorá udržiava vzdialenosť jednotky od seba [Obr.2]. Hodnota dynamickej viskozity závisí na teplote a tlaku. Pre matematický výpočet dynamickej viskozity sa používa vzťah (2). Jednotkou dynamickej viskozity je pascalsekunda [$Pa \cdot s$][1, 3, 4, 10, 12].



Obr.2 Rýchlostný profil Newtonovskej kvapaliny[10]

2.3. Kinematická viskozita

Je miera odporu toku kvapaliny pri pôsobení gravitačnej, zotrvačnej alebo trecie sily. Kinematická viskozita je určená pomerom dynamickej (tzv. absolútnej) viskozity kvapaliny k jej hustote. Matematicky vyjadrená je podľa vzťahu (3). Pri stúpaní teploty kvapaliny kinematická viskozita klesá[1, 3, 4, 10, 12].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

Jednotkou SI kinematickej viskozity je [$m^2 \cdot s^{-1}$], ale veľmi často sa používa alternatívna jednotka stoke [St][1].

Prevod jednotiek kinematickej viskozity

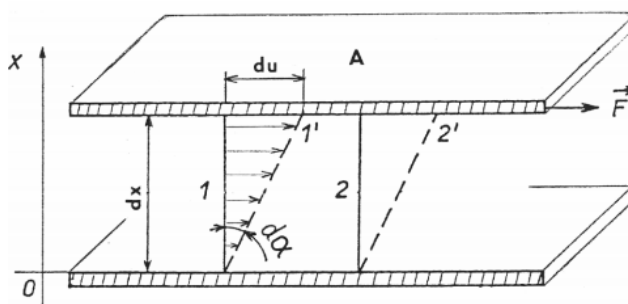
$$1 \text{ St} = 10^{-4} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

$$1 \text{ St} = 100 \text{ cSt}$$

$$1 \text{ cSt} = 10^{-6} [m^2 \cdot s^{-1}]$$

2.4. Newtonovské kvapaliny

Do tejto kategórie kvapalín patria ideálne kvapaliny, ktoré sú dokonalé tekuté. Pri jej pohybe nevznikajú medzi stýkajúcimi vrstvami vôbec žiadne šmykové (tangenciálne) sily. To znamená, že viskozita vôbec nie je ovplyvnená šmykovým napätím a gradientom rýchlosti [Obr.3]. Viskozita ostane konštantne rovnaká aj pri použití rozličných modelov viskozimetrov, vretien alebo aj rýchlosti, ktoré použijeme pre meranie pri rôznych teplotách. Sú o dosť jednoduchšie pre meranie ako Neneutronské kvapaliny. Pri Newtonovských kvapalinách je toková krivka lineárna[1, 2, 3, 4, 7,8].



Obr.3 Rýchlostný profil toku v kvapaline medzi pohyblivou a nepohyblivou vrstvou[3]

2.5. Neneutronské kvapaliny

Ich závislosť sa všeobecne vyjadruje tak, že pomer šmykového napätia ku gradientu rýchlosti nie je konštantný (nelinárny). Tento pomer sa môže nazvať aj ako zdanlivá viskozita, ktorá nie je látkovou konštantou a je vyjadrená vzťahom (4). Zdanlivá viskozita má význam len vtedy, pokiaľ poznáme hodnotu šmykovej deformácie (metódy merania) alebo gradientu rýchlosti. Tok kvapalín môžeme matematicky vyjadriť pomocou reologických stavových rovníc, ktoré vyjadrujú vzťah medzi šmykovým napätím a deformáciou kvapaliny. Grafickým vyjadrením toku kvapalín sú tokové krivky nazývané reogrami [Obr.4][1, 2, 3, 4,7, 8].

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{dv}{dx}} = \frac{\tau}{j} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (4)$$

Chovanie Neneutronovej kvapaliny sa dá určiť z reologického modelu. Reologický model vyjadruje závislosť medzi deformáciou a napätím. Jeden z reologických modelov je aj mocninový, ktorý sa dá určiť vzťahom (5)[1, 2, 3, 4,7, 8].

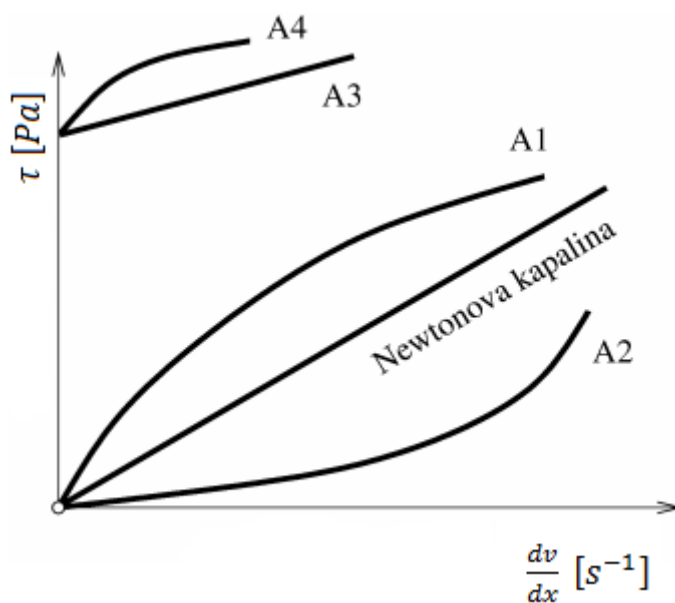
$$\tau = K \cdot \left(\frac{dv}{dx}\right)^n = K \cdot j^n \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

n – index toku pre:

- nenewtonovské kvapaliny je $n < 1$
- newtonovské je $n = 1$
- dilatantné $n > 1$

Ďalšie reologické modely sú podľa Bulkley-Herschella, Binghamu, Eyringa, atď.

Nenewtonovské kvapaliny sú rozdelené na pseudoplastické, dilatačné, plastické kvapaliny [1, 2, 3, 4, 7, 8].



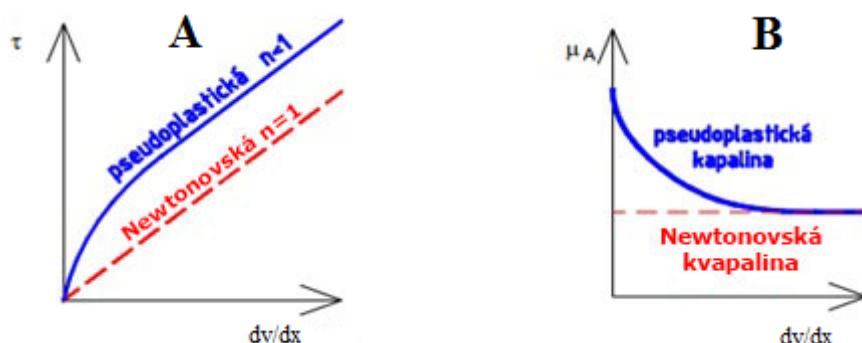
Obr.4 Reogramy nenewtonovských kvapalín, A1-Pseudoplastická kvapalina, A2-Dilatačná kvapalina, A3-Ideálna kvapalina, A4-Skutočná kvapalina[8]

Pseudoplastické kapaliny

Charakteristické sú tým, že pokiaľ ich zdanlivá viskozita klesá, tak rastie gradient rýchlosti [Obr.5A]. Tento druh kvapalín sa nazýva aj ako rednúce kvapaliny. Rednutie je zapríčinené tým, že keď je kvapalina v pokoji, tak jej častice sú náhodné a nesúmerné rozmiestnené a ich hlavná os je rôzna. Stúpaním gradientu rýchlosti sa častice viac vyrovnávajú a orientujú smer ich hlavných os do pohybu. Vďaka tomuto účinku zdanlivá viskozita klesá až do bodu, kedy je usporiadanie častíc úplne dokonalé [Obr.5B]. Pri dosiahnutí dokonalého stavu sa zdanlivá viskozita nemení a závislosť šmykového napätia na gradientu rýchlosti ostáva lineárna. Predpokladá sa, že pri pseudoplastickom chovaní

sa orientácia častíc zmení hneď alebo po krátkom čase. Ak je kvapalina namáhaná konštantným šmykovým napätím, tak potrebujeme určitý čas, aby sa nám zdánlivá viskozita zmenila. Tento druh chovania kvapaliny sa nazýva trixotropný.

Tixotropná toková krivka nastáva, keď závislosť viskozity postupom času klesá a tým sa viskozita znižuje a kvapalina riedne. Je to dané klesaním šmykového napätia v závislosti na veľkosti gradientu rýchlosti [Obr.8][1,3,4,7].

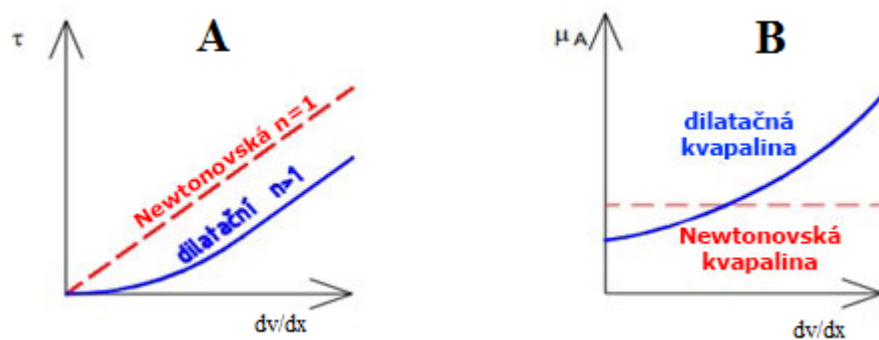


Obr.5 Charakteristiky pseudoplastických kvapalín, A- toková krivka pseudoplastických kvapalín, B- zmena zdánlivej viskozity pseudoplastického kvapaliny v závislosti na gradientu rýchlosti[1]

Dilatačné kvapaliny

Tento druh kvapalín je svojím chovaním proti pólom pseudoplastických kvapalín. Je to zapríčinené zvýšením zdánlivej viskozity v závislosti na šmykovom napätí [Obr.6A]. Kvôli zvyšujúcej viskozite sa nazývajú aj ako hustnúce kvapaliny. Medzi dilatácne kvapaliny patrí napríklad betón, med, atď. Zvýšenie zdánlivej viskozity je zapríčinené tým, že objem dutín v kludnom stave je minimálny medzi časticami suspenzie a na vyplnenie týchto dutín stačí objem kvapaliny v okolí. Kvapalina dosahuje vlastnosti maziva vtedy, keď je gradient rýchlosti a šmykové napätie malé. Pokiaľ sa gradient rýchlosti zväčšuje, tak sa zmení aj usporiadanie častíc na vrstvomé usporiadanie. Suspenzia sa roztiahne (dilatuje) a zväčší sa priestor medzi časticami. Dilatáciou nastane nedostatok maziva, nastáva kontakt medzi časticami a zvyšuje sa šmykové napätie. Závislosť rastu zdánlivej viskozity na gradientu rýchlosti spôsobí dilatácia suspenzie [Obr.6B]. Ak bude mať rast zdánlivej viskozity časové oneskorenie, nastane jav, ktorý sa volá reopexia.

Reopexná toková krivka nastáva, keď závislosť viskozity postupom času rastie a tým sa viskozita zvyšuje a kvapalina stáva tuhšiou. Je to dané rastom šmykového napätia v závislosti na veľkosti gradientu rýchlosti. [Obr.8][1,3,4,7].



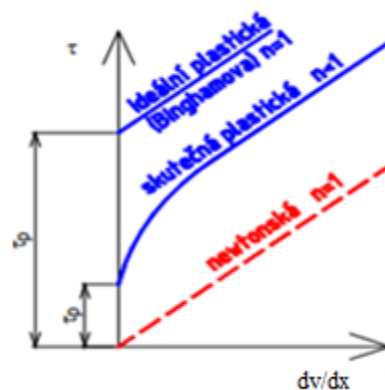
Obr.6 Charakteristiky dilatačných kvapalín, A- toková krivka dilatačnej kvapaliny, B- zmena zdanlivej viskozity dilatačnej kvapaliny v závislosti na gradientu rýchlosti[1]

Plastické kvapaliny

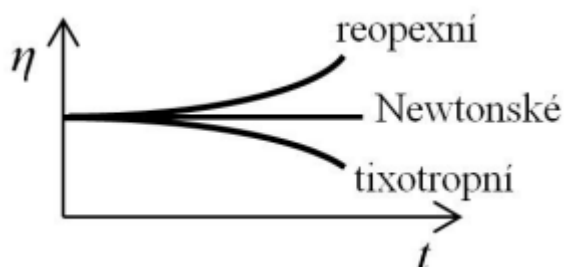
Tieto kvapaliny sa delia na ideálne kvapaliny (Binghamové) a skutočne plastické kvapaliny. Plastické kvapaliny sa chovajú ako pevné latky a ich štruktúra v pokoji je trojrozmerná. Majú hranicu toku (počiatočné napätie), ktorá umožňuje šmykovému napätiu odolávať po nejakú dobu. Ak bude táto hranica prekročená, tak kvapalina začne tiecť. Závislosť šmykového napätia na gradientu rýchlosti ideálnych kvapalín bude lineárna a viskozita konštantná [Obr.7]. Závislosť šmykového napätia na gradientu rýchlosti skutočne plastických kvapalín bude nelineárne [Obr.7]. Do tejto kategórie kvapalín patria plastické maziva, plasty, bahna, atď.

Matematické vyjadrenie šmykového napätia ideálnej (Binghamovej kvapaliny) môžeme určiť pomocou Binghamovho reologického modelu vzťahom (6)[1,3,4,7].

$$\tau = \tau_p + \eta \cdot \frac{dv}{dx} \quad [Pa] \quad (6)$$



Obr.7 Toková krivka ideálnej a skutočnej plastickej kvapaliny[1]



Obr.8 Reogramy reopexie a tixotropie Neneutnovských kvapalín[11]

2.6. Spôsoby merania viskozity

Prístrojov na meranie viskozity bolo vytvorených veľa na rôznych princípoch. Pre meranie viskozity musíme spĺňať podmienku, podľa ktorej musí byť prúdenie kvapaliny laminárne. Do základného rozdelenia viskozimetrov patria výtokové, telieskové, rotačné a vibračné[2].



Obr.9 Druhy viskozimetrov, A-Tlakový kapilárny viskozimeter, B- Guličkový viskozimeter, C- Rotačný viskozimeter[15]

Výtokové viskozimetre

Pracujú na princípe vytekania kvapaliny z nádoby s meranou kvapalinou do prazdnej nádoby, kde sa meria objem kvapaliny, ktorý vytekol za časovú jednotku. Kvapalina preteká z jednej nádoby do druhej cez trubicu (kapiláru). Priemer kapilary udáva rýchlosť vytekania kvapaliny pri zachovanej podmienke laminárneho prúdenia. Podľa Poisseuillovho vzťahu určíme dynamickú viskozitu (7). Pre meranie Nennetnovských kvapalín sa používajú prietokové kapilárne viskozimetre, pri ktorých sa dá nastaviť tlakový spád. S klesajúcim prietokom kvapaliny bude viskozita rásť[1,2,3,4,16].

$$\eta = \frac{\Delta p \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot Q} \quad [Pa \cdot s] \quad (7)$$

Medzi výtokové viskozimetre patria Eulerov, Redwoodov, Sayboltov, Ostswaldov, Kohlov, Ubbelohdov, Vogel-ossag, kapilárny viskozimeter pretlakový, kapilárny viskozimeter s piestom[2].

Englerov viskozimeter

Englerov viskozimeter je zložený z nádoby s meranou kvapalinou, ktorá je ponorená vo väčšej nádobe s vodou slúžiacou na ochladzovanie alebo ohrievanie meranej kvapaliny. Do nádoby nalejeme 240cm^3 meranej kvapaliny a meriame doby výtoku $t_p, 200\text{cm}^3$ kvapaliny. Takisto meriame aj dobu výtoku destilovanej vody $t_v, 200\text{cm}^3$ destilovanej vody. Vypočítame Englerov stupeň, ktorý udáva pomer doby výtoku meranej kvapaliny a vody (8)[1,2,3,4,16].

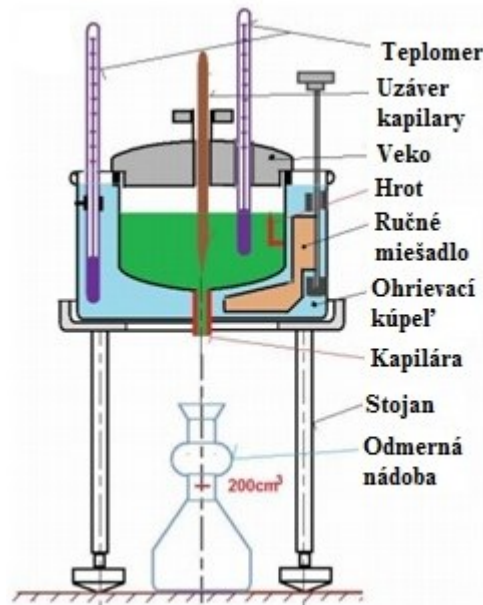
$$E = \frac{t_p}{t_v} \quad [^\circ E] \quad (8)$$

Vypočítane Englerové stupne musíme prepočítať na hodnotu kinematickej viskozity pomocou empirického vzťahu (9), ktoré prepočítame pomocou regresnej závislosti [2].

$$\nu = \left(7,31 \cdot ^\circ E - \frac{6,31}{^\circ E} \right) \cdot 10^{-6} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (9)$$

Podľa vypočítanej kinematickej viskozity môžeme vypočítať dynamickú viskozitu pomocou vzťahu(10)[2].

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad [Pa \cdot s] \quad (10)$$



Obr.10 Popis Englerovho viskozimetru[2]

Telieskové (guličkové) viskozimetre

Funguje na princípe Stokesovej metódy. Viskozitu zistíme podľa toho, akou rýchlosťou padne guľička v trubici s naklonením približne o 10°C pomocou vlastnej tiaže. Naklonená trubica je naplnená meranou kvapalinou. Meranú kvapalinu je nutné udržiavať na požadovanej teplote, ktorá nemôže veľmi kolísť, inak sa meranie nepodarí. Na guľičku v trubici pôsobia aj tiažová, vztlaková a odporová sila. Z daných a nameraných hodnôt môžeme vypočítať dynamickú viskozitu podľa vzťahu (11)[1,2,3,4,16].

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 (\rho_k - \rho_v) \cdot g \cdot \cos \alpha}{9 \cdot w} \quad [Pa \cdot s] \quad (11)$$

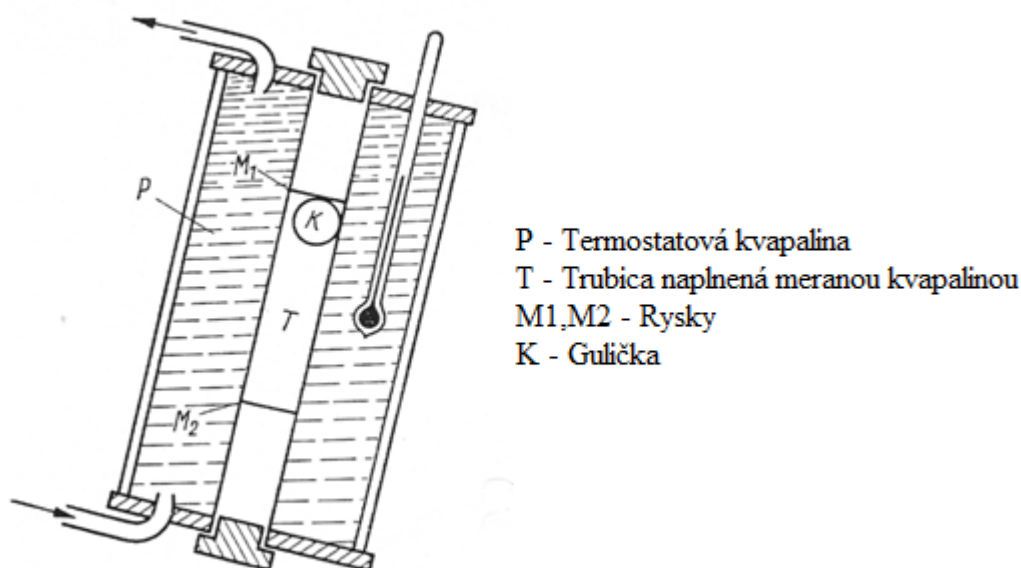
Druhy telieskových viskozimetrov sú Stokesov viskozimeter, bublinkový (relatívne a absolútne meranie), Höpplerov , reoviskozimeter s tlačnou guľičkou, viskozimeter s elektromagneticky ovládanou guľičkou, piestový viskozimeter podľa Norcrossa [2].

Höpplerov viskozimeter

Tento viskozimeter využíva voľný pád telesa, ktorým zvyčajne býva kovová guľička. Tento pád sa odohráva v kalibrovannej sklenenej trubici, ktorá je naklonená o 10°C a je naplnená meranou kvapalinou. Na trubici sú vyznačené 2 rysky a meria sa čas za ktorý spadne guľička od vrchnej rysky k spodnej. Z dôvodu skoro totožných priemerov trubice a guľičky sa vypočíta dynamická viskozita pomocou vzťahu (12)[1,2,3,4,16]..

$$\eta = k \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot \tau \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (12)$$

Pomocou Hopplerovho viskozimetra môžeme merať viskozitu pre rôzny rozsah teplôt. Trubica s meranou kvapalinou je ponorená do väčšej trubice, v ktorej sa nachádza cirkulujúca voda. Tá slúži na prenos tepla a následný ohrev meranej kvapaliny na požadovanú teplotu. Ohrev vody je zabezpečený pomocou termostatu[2].



Obr.11 Popis Höpplerovho viskozimetru[4]

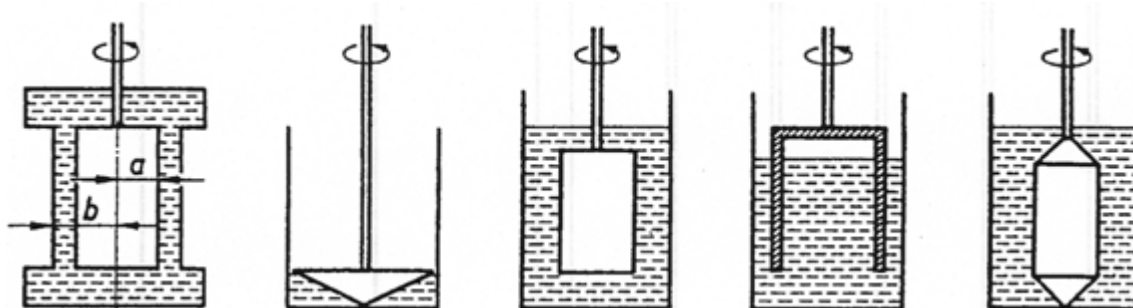
Rotačné viskozimetre - reometre

Tento druh viskozimetra určuje viskozitu pomocou pôsobenia silových účinkov dvoch plôch, kde jedna rotuje a druhá je stacionárna. Obe plochy sú v temperovanej nádobe, ktorá je naplnená meranou kvapalinou. Rotačné viskozimetre pre meranie Newtonských kvapalín sa nazývajú reometre. Rozdeľujú sa na viacero typov, kde hlavné typy sú „typ cs“ a „typ cr“.

Reometer typu cs – je s riadením smykového napätia. Nastavuje sa krutiací moment a merajú sa otáčky.

Reometer typu cr – je s riadením šmykovej deformácie. Nastavujú sa otáčky a meria sa krútiaci moment.

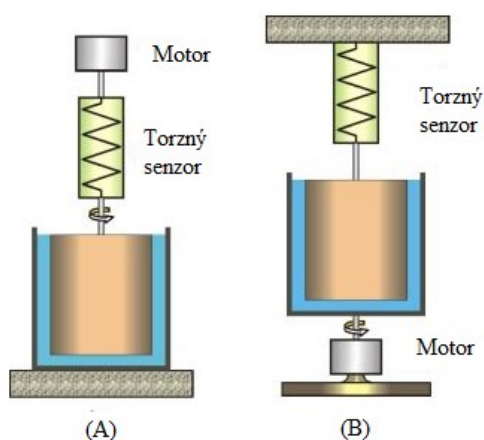
Reometre typu CR sú podľa pôsobenia silových plôch rozdelené na 3 druhy. Sú to valec – valec, kužeľ – doska, doska – doska [1,2,3,16].



Obr.12 Druhy rotačných viskozimetrov s rozny m upravenym meriacim priestorom[4]

Valec – Valec

Tento typ reometra sa skladá z dvoch súosých valcov, s ktorých je jeden stacionárny a druhý rotuje konštantnou uhlovou rýchlosťou „ ω “. Pri rotácii vnútorného valca sa hovorí o Couettovom prúde v medzikruží. Pri rotácii vonkajšieho valca sa hovorí o systéme Searle. Oba valce majú spoločnú osu a vzhľadom nato aj rovnaké otáčky, preto nezáleží na tom, ktorý valec sa bude otáčať vnútorný alebo vonkajší[2,3,4].



Obr.13 Princíp rotačného viskozimetra typu valec valec, A- rotuje vnútorný valec – Couettov systém, B- rotuje vonkajší válec-system Searle

Grafické označenie rozmerov valca je na [Obr.14]

Krutiací moment vypočítame pre rotačný reometer typu valec-valec vypočítame podľa vzťahu (13)[2].

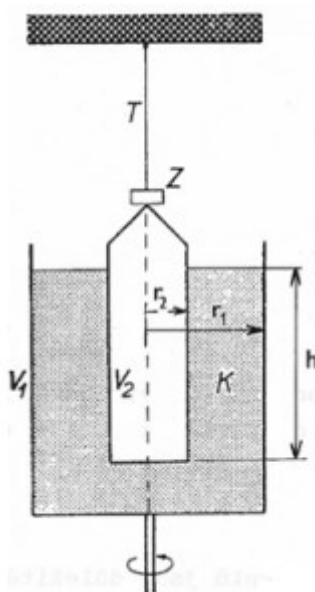
$$M = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \tau \quad [N \cdot m] \quad (13)$$

Výpočet šmykového napätia pre rotačný reometer typu valec-valec vypočítame podľa vzťahu (14)[2].

$$\tau = \eta \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dr} \quad [Pa] \quad (14)$$

Dynamickú viskozitu pre rotačný reometer typu valec-valec vypočítame podľa vzťahu (15)[2].

$$\eta = \frac{M}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega} \cdot \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right] \quad [Pa \cdot s] \quad (15)$$

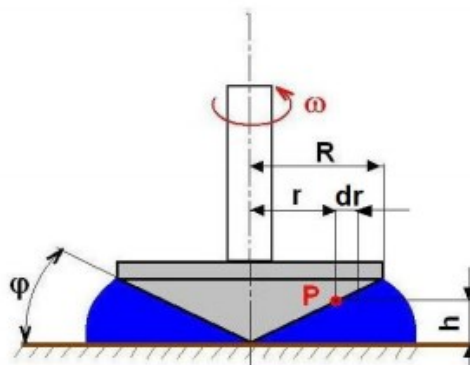


Obr.14 Grafické znázornenie rotačného viskozimetru typu valec- valec system Couett[4]

Kužel' - doska

Má taktiež 2 druhy prevedenia. Rotujúci bude kužel' a doska zostane v statickej polohe alebo bude rotovať doska a kužel' zostane statický. Rotujúca časť sa bude otáčať uhlovou rýchlosťou „ ω “. K dosiahnutiu potrebnej uhlovej rýchlosti je potrebný krútiaci

moment, ktorý je prenášaný pomocou kvapaliny a závisí na veľkosti viskozity meranej kvapaliny. Priestor medzi doskou a kužeľom vyplní meraná kvapalina. Z dôvodu, že sa môže uhlová rýchlosť dostať do kritických otáčok, tak má rýchlosť obmedzenie. Grafické označenie rozmerov je na [Obr. 15][2,3,4].



Obr.15 Grafické znázornenie rozmerov rotačného viskozimetra typu kužeľ- doska[2]

Výpočet šmykového napätia pre prevedenie kužeľ – doska je vyjadrený pomocou podľa vzťahu (16)[2].

$$\tau = \frac{3 \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot r^3} \quad [Pa] \quad (16)$$

Doska – doska

Pracuje na princípe rotačného toku medzi doskami. Dve dosky sú v jednej rovnobežnej rovine a rotujú okolo jednej osy s rôznymi uhlovými rýchlosťami. Jedna doska je v stacionarnom stave a druhá rotuje pri konštantnej uhlovej rýchlosti. Vzdialenosť medzi doskami vplýva na gradient rýchlosti [3].

Vibračné viskozimetre

Pracujú na princípe tlmeného kmitania telesa , ktoré je ponorené v meranej kvapaline .Teleso môže mať pohyb torzný alebo priečny. Teleso môže mať tvar z pohľadu geometrie typu valca, dosky, kruhového terča , atď.

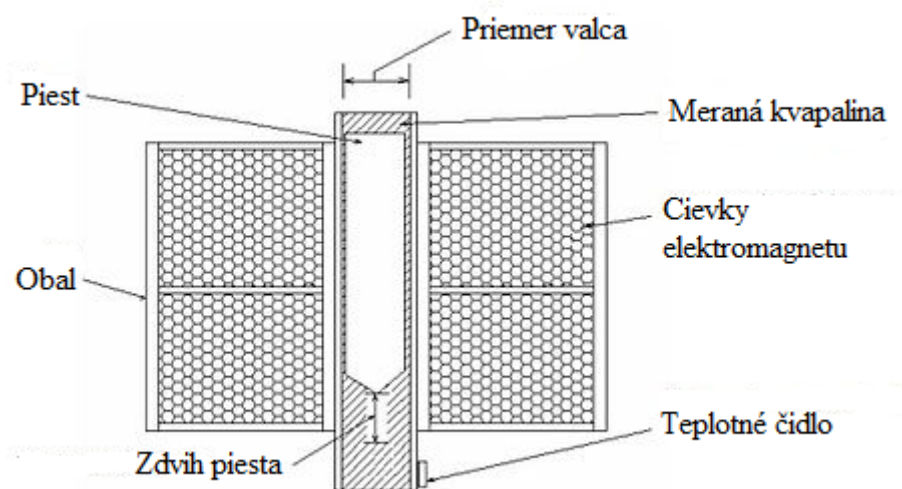
Sú 3 spôsoby merania vibračným viskozimetrom:

- Meria sa príkon pre osciláciu s konštantnou amplitúdou a konštantnou frekvenciou
- Meria sa doba útlmu po vypnutí prístroja
- Meria sa rezonančná frekvencia

Druhy vibračných viskozimetrov sú vibračný viskozimeter CAMBRIGE , vibračný viskozimeter založený na meranie útlmu kmitajúcich dvoch tenkých terčov [2].

Vibračný viskozimeter CAMBRIGE

Hlavné zložky tohto viskozimetra sú elektromagnet, v ktorého priestoroch je ponorený piest (plavák) spolu s meranou kvapalinou. Elektromagnet striedavo zapína hornú a dolnú cievku, ktorá priťahuje piest smerom hore alebo dole konštantnou silou. Viskozita sa určuje podľa rýchlosti pohybu piesta (plaváka). Meraná kvapalina môže byť priesvitná , priehľadná aj nepriehľadná v rozmedzí teplôt -30°C až po 190°C a pre tlak do niekoľko desiatok MPa[2,13].



Obr.16 Rez elektromagnetu vibračného viskozimetru- CAMBRIGE[12]

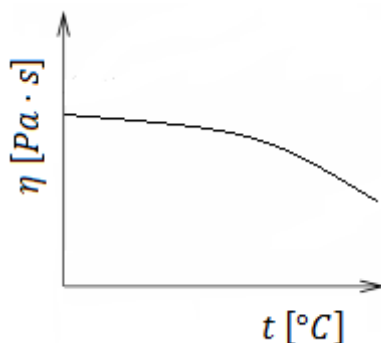
2.7. Opatrebenie kvapalin

Viskozita je veľmi dôležitá pre chod hydraulických mechanizmov. Zmena viskozity môže narobiť veľa nepríjemností ako zadrenie motora, menšiu účinnosť motora. Toto opotrebenie závisí na viacerých zložkách ako zmene teploty, zmene tlaku, životnosti [1].

Závislosť viskozity na teplote

Viskozita je veľmi závislá na teplote, ktorá ju výrazne mení a môže zmeniť správnu funkciu hydraulického obvodu. S rastúcou teplotou (zohrievaní) kvapaliny viskozita klesá a pri klesajúcej teplote (chladení) viskozita rastie. Dynamická viskozita pri závislosti na teplote sa dá matematicky vyjadriť podľa vzťahu (17). Grafická závislosť viskozity na teplote pri konštantných otáčkach je znázornená na [Obr.17][1]

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-a(T-T_0)} \quad [Pa \cdot s] \quad (17)$$

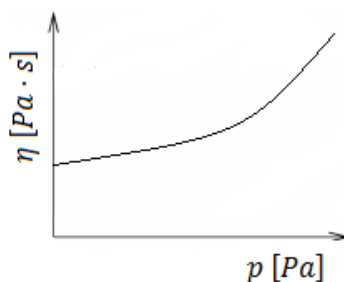


Obr.17 Grafické znázornenie závislosti viskozity na teplote

Zavislost' na tlaku

Pri zväčšujúcom sa pôsobení tlaku viskozita rastie. Výraznejšie sa prejavuje pri nižších teplotách kvapaliny. Výraznejšia zmena viskozity nastáva pri väčších tlakoch a do 100MPa sa s viskozitou neuvažuje. Závislosť dynamickej viskozity na tlaku sa dá určiť pomocou matematického vzťahu (18). Grafická závislosť viskozity na teplote pri konštantných otáčkach je znázornená na [Obr.18][1].

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-b(p-p_0)} \quad [Pa \cdot s] \quad (18)$$



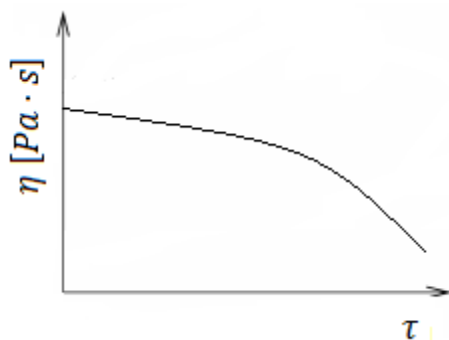
Obr.18 Grafické znázornenie závislosti viskozity na tlaku

Starnutie kvapaliny

Aj keď je hodnota gradientu rýchlosti na stálej konštantnej rýchlosti, tak aj napriek tomu sa mení viskozita odstupom času. Je to spôsobené tým, že počas šmykového napätia sa mení štruktúra (zmeny sú vratne) a nie je to zapríčinené elasticitou. Platí to pre časovo závislé látky. Viskozita sa môže odstupom času buď zväčšovať alebo znižovať.

V prípade, že viskozita klesá, tak nastáva chovanie látky, ktoré sa nazýva trixotropné.

V prípade, že sa viskozita rastie, tak nastáva chovanie látky, ktoré sa nazýva reopexné [4,11].



Obr.19 Grafické znázornenie závislosti viskozity na čase opotrebovania

3. Meranie vzoriek a ich závislosť na teplote

Úlohou bolo zmerať 12 rozličných vzoriek A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3, D1, D2, D3, ktoré obsahovali zmes grafitu. Skupiny vzoriek boli rozdelené podľa troch rôznych skupín hustôt podľa poradového čísla daných vzoriek. Vzorky s poradovým číslom 1 (A_1, B_1, C_1, D_1) mali hustotu $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vzorky s poradovým číslom 2 (A_2, B_2, C_2, D_2) mali hustotu $\rho = 1016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vzorky s poradovým číslom 3 (A_3, B_3, C_3, D_3) mali hustotu $\rho = 1028 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Namerané hodnoty budú pridané v elektronickej prílohe.

Meranie sa vykonávalo v teplotnom rozsahu od 20°C do 50°C. Meranie bude prevádzkané pri zvyšovaní teploty o 5°C. Pri každom navýšení bude meranie prebiehať pri rozsahu otáčok od 41 do 181 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a otáčky budú taktiež navýšené o 20 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

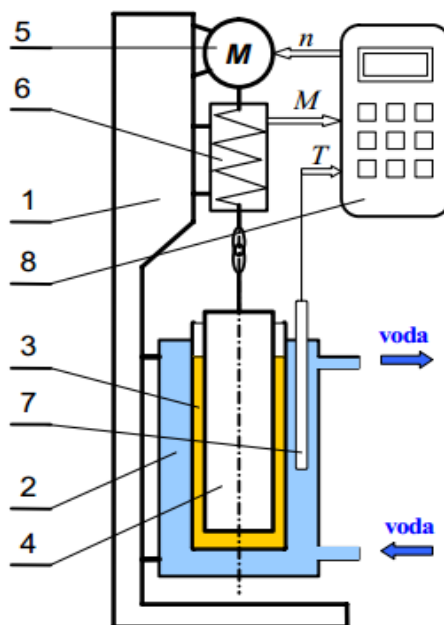
3.1. Meracie zariadenie

Celé zariadenie sa bude skladať počítača s programom Rheocalc, reometra a termostatu [Obr.20]. Typ reometru je DV-II+PRO od firmy Brookfield, ktorého popis časti je na [Obr.21]. Reometer je zložený z elektromotora, ktorého krutiací moment je prenášaný na vreteno. Vreteno je ponorené do nádoby s meranou kvapalinou. Táto nádoba je ponorená v ďalšej nádobke, v ktorej sa nachádza cirkulujúca voda. Tá slúži na prenos tepla potrebného k ohrevu meranej kvapaliny na požadovanú teplotu. Teplota vody je zabezpečená pomocou termostatu TC502, ktorý pomocou odporových vodičov vodu zohrieva. Reometer obsahuje aj snímač momentu a teplotné čidlo pre snímanie teploty meranej vzorky. Neodmysliteľnou súčasťou zariadenia je počítač, ktorý obsahuje program Rheocalc a slúži na automatické ovládanie reometra z počítača [17, 18].



Obr.20 Reometer DV-II+PRO napojený na počítač s programom Rheocalc a termostat[6]

Rotačný reometer je typu CR, ktorý je s riadením šmykovej deformácie a otáčky vretena nastavuje osoba obsluhujúca zariadenie. Merať sa bude odporový moment kvapaliny „ M' “. Viskozita sa určuje podľa silových účinkov, ktoré nastanú medzi vretenom a meranou nádobkou. Reometer bude typu valec-valec. Rotovať bude vnútorný valec a z toho vieme, že pôjde o reometer s Couettovým prúdením[2, 17].

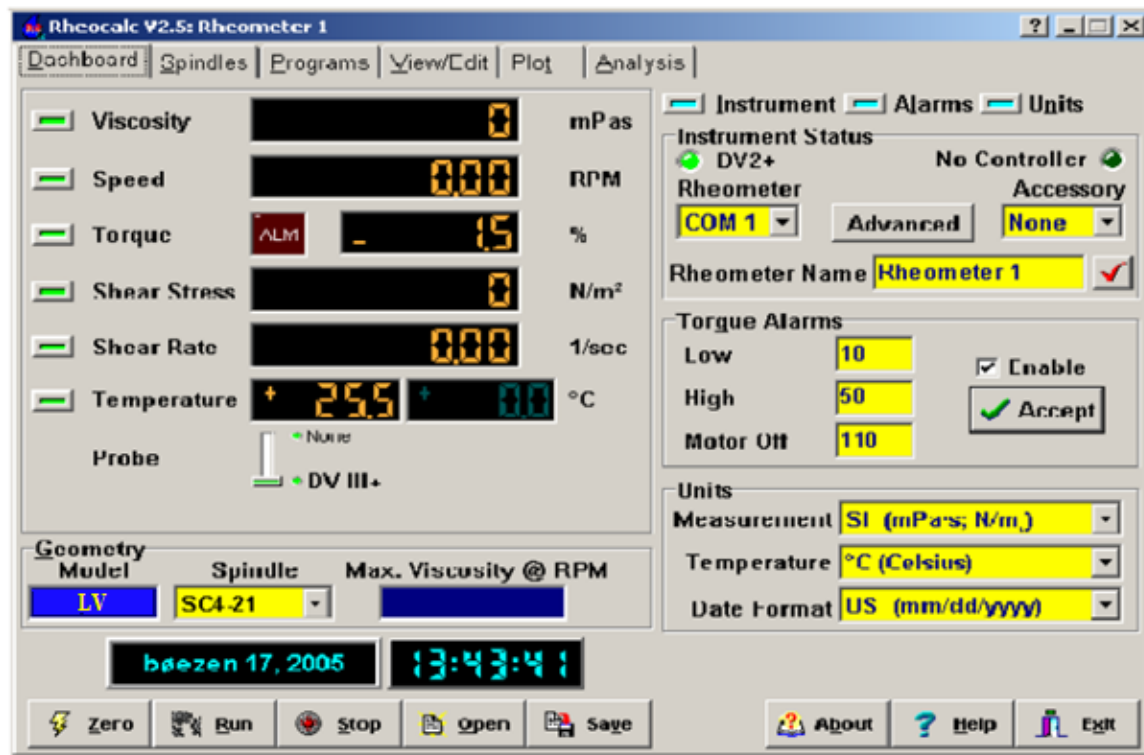


Obr.21 Popis rotačného reometra od firmy Brookfield

1-Rám, 2- Nádobka s vodou pre temperovanie nádobky s meranou kvapalinou, 3- Nádobka s meranou kvapalinou, 4- Vreteno, 5- Elektromotor pre pohon vretena, 6- Snímač krútiaceho momentu, 7- Teplotné čidlo, 8- Riadiaca jednotka[6]

3.2. Postup merania

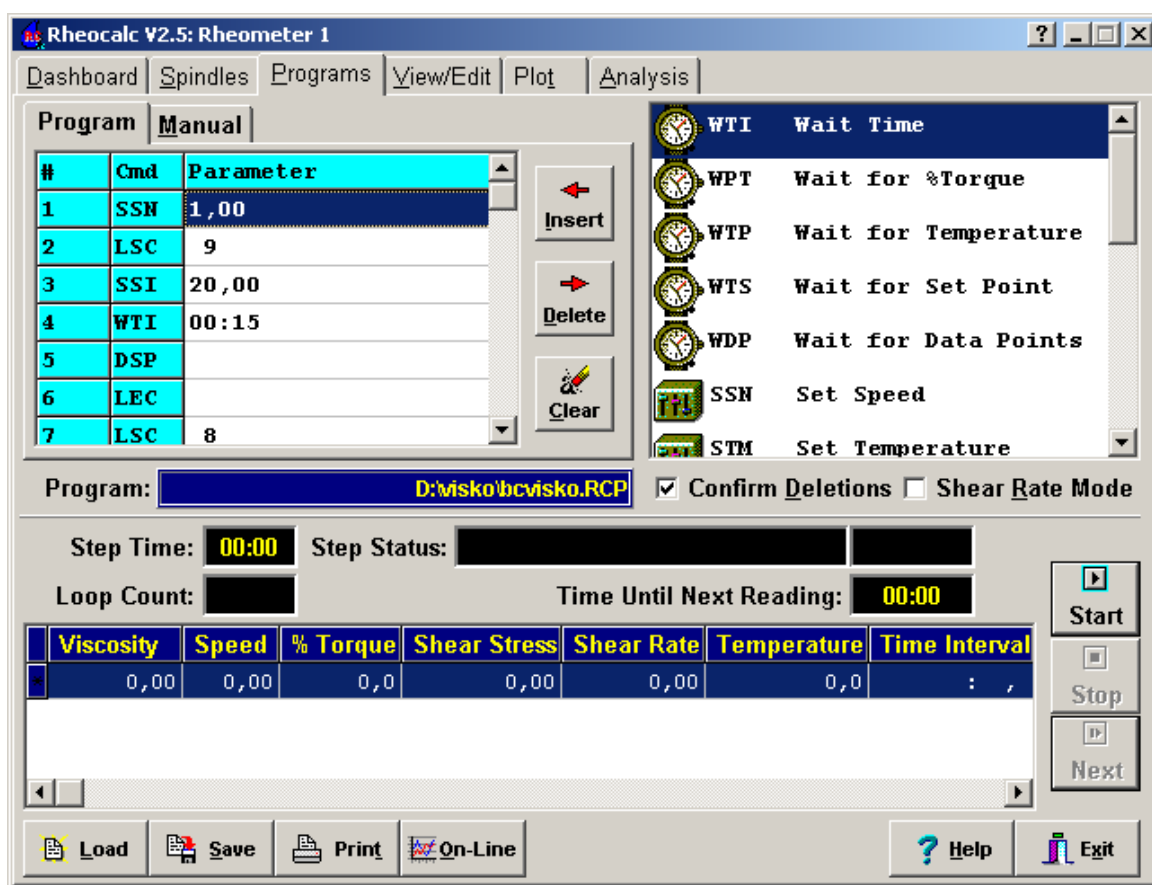
Základným bodom je pripojenie reometra DV-II+PRO od firmy Brookfield k počítaču s programom Rheocalc pomocou sériového portu. Ako prvý sa zapína reometer a manuálne pomocou tlačidiel pod displejom reometra zvolíme možnosť „external mode”. Po tomto nastavení je reometer plne funkčný pre ovládanie pomocou programu Rheocalc, ktorý následne spustíme. Po spustení programu sa otvorí hlavná stránka programu, ktorá je otvorená pod záložkou „Dashboard” [Obr.22]. Dôležité je, aby sme pred každým meraním vynulovali reometer, načo nás v prípade zabudnutia upozorní program. Pred nulovaním musíme odpojiť (vyšrobovať) vreteno so záťažou. Po následnom odpojení vynulujeme reometer pomocou príkazu „Zero”, ktorý sa nachádza v záložke „Dashboard” programu Rheocalc [Obr.22]. Po vynulovaní pripojíme vreteno so záťažou naspäť k reometru, na spodok hriadeľa, ktorý má opačný závit (ľavý) ako je smer otáčania vretena. Pre náš typ reometra LVDV-II+PRO je sada šiestich vretien. My sme zvolili vreteno typu SC4-21. V záložke programu „Dashboard” nastavíme typ zvoleného vretena pod názvom „spindle”. Taktiež si nastavíme jednotky pre meranie a teplotu. Pri nastavení jednotiek „measurement” si zvolím jednotky SI a pre teplotu „temperature” nastavím °C[18].



Obr.22 Úvodná záložka „Dashboard“ v programe Rheocalc[6]

Po tomto nastavení by už nemalo nič brániť pri meraní viskozity a pomocou príkazu „Run” v záložke „Dashboard” začneme meranie [Obr.22]. Nastavíme si otáčky „speed” a teplotu „temperature”. Teplota sa nastavuje na termostate. Na úvodnej stránke programu sa nám zobrazia namerané hodnoty viskozity „viscosity”, percento krútiaceho momentu „torque”, šmykové napätie „shear stress” a šmykovú deformáciu „shear rate”.

Záložka „programs” Slúži na ovládanie reometra pomocou programovateľného jazyka B.E.A.V.I.S. , ktorý bude riadiť reometer podľa prednastavených hodnôt [Obr.23]. Nastavené hodnoty nám vyobrazí v ľavom hornom rohu v programe Rheocalc [18].



Obr.23 Záložka „programs” v programe Rheocalc

Záložka „View/Edit” nám vyobrazí namerané hodnoty. Namerané hodnoty pomocou príkazu „EXPORT” odoslať do tabuľkovej podoby, ktoré môžeme následne otvoriť v programe Excel a tam vykonať ďalšie úkony pre ich ďalšie spracovanie ako grafy, výpočty, atď.(záložka)

Ostatné záložky programu Rheocalc sú:

Záložka „Plot” slúži na grafické vykreslenie závislosti nameraných hodnôt.

Záložka „Spindles” nám ukazuje zoznam vretien a rozsah viskozít.

Záložkou „analysis” slúži na vytvorenie analýzy pomocou matematického modelu z nameraných hodnôt.

3.3. Program B.E.A.V.I.S

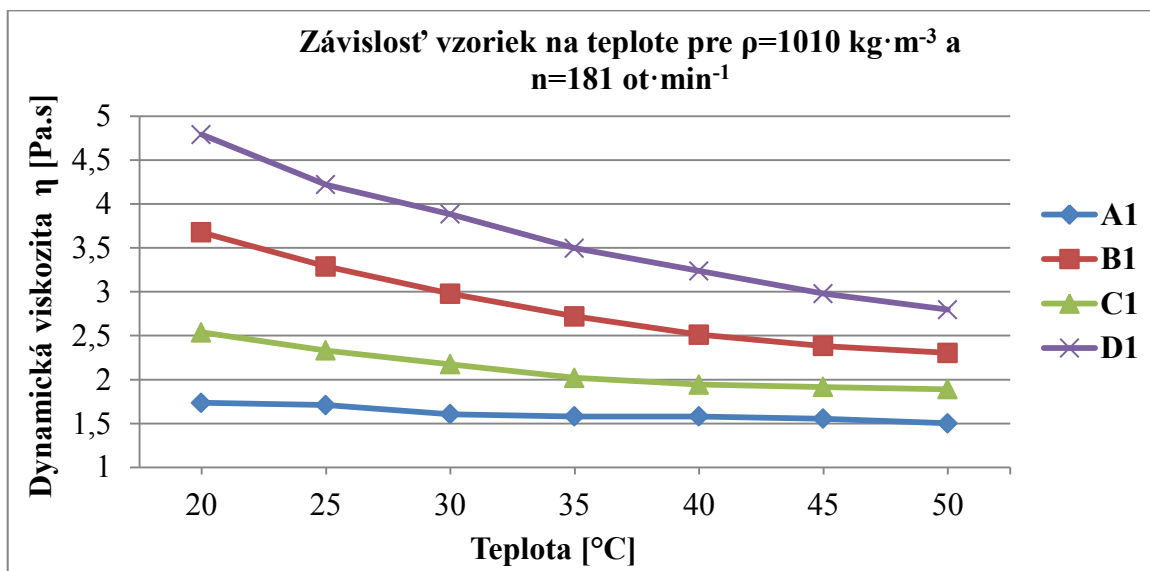
Program B.E.A.V.I.S.(Brookfield Advanced Viscosimeter Instruction Set) nám výrazne uľahčuje prácu pri meraní na reometri. Pri tomto programe si nastavíme stabilné hodnoty daných parametrov a program ich automaticky mení v závislosti rôznych parametrov, ktoré si ukážeme v tabuľke [Tab.1]. Program B.E.A.V.I.S. načítame do programu Rheocalc pomocou príkazu „Load”, ktorý sa nachádza v záložke „Programs” [Obr.23]. Ihneď po nahratí program B.E.A.V.I.S. sa nám zobrazí v pravom hornom rohu v záložke „Programs” program Rheocalc. Následne vložíme načítany program pomocou tlačidla „Insert” do program Rheocalc[17].

Tab.1 Funkcie programu B.E.A.V.I.S.[17]

Kód príkazu		Požadovaný popis parametrov príkazov
WTI	Doba (MM:SS)	Program meria pri tomto kroku, pokiaľ neuplynie špecifikovaná doba MM:SS = minuty:sekundy
WPT	% Percento hodnôt krutiaceho momentu (%)	Program čaká pri tomto kroku, pokiaľ sa aktuálne % krutiaceho momentu nerovná špecifikovanej hodnote
WTP	Hodnota teploty (°C)	Program čaká pri tomto kroku, pokiaľ sa aktuálna teplota nerovná špecifikovanej teplote
SNN	Hodnota rýchlosti (RPM)	DV-II+PRO začne rotovať pri špecifikovanej rýchlosti
SPI	Čas (MM:SS)	DV-II+PRO tlačí dáta na vybranej tlačiarňi, alebo posiela dáta do programu v počítači pri špecifikovanej rýchlosti MM:SS = minúta:sekunda
SSI	+/- hodnoty rýchlosti (RPM)	Zvýšenie alebo zníženie rýchlosti o nadefinovaný krok
LSC	Počet meracích slučiek	Udáva nám koľkokrát sa slučka po odpočítaní opakuje
LEC	Uzavretie jedného meracieho cyklu	Uzaviera meriaci cyklus
DSP	Jednorazové odosielanie dát	Tento príkaz nám vyobrazí riadok hodnôt získaných z meraní

3.4. Závislosť nameraných vzoriek na teplote podľa hustoty

Pre prvú závislosť som vybral viskozitu vzoriek s hustotou $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, kde na x-ovu osu nanesieme rozsah teplôt merania a na y-ovu osu dynamickú viskozitu pri konštantných otáčkach vretena $n=181 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Pre ostatné hustoty bude závislosť uvedená v prílohe.



Obr.24 Závislosť viskozity vzoriek s hustotou $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ na teplote pri konštantných otáčkach $n=181 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$

Zhodnotenie

Vzorka D1 pre danú hustotu malá klesanie viskozity najvýraznejšie a zároveň bola najhustejšiou vzorkou pre danú hustotu.

Vzorka A1 mala najmenej výrazne klesanie viskozity v závislosti na teplote a minimálne menila veľkosť viskozity a bola najriedšou vzorkou spomedzi všetkých.

Vzorka B1 malá druhu najvyššiu viskozitu a klesanie v závislosti na teplote bolo minimalné oproti vzorke D1. Pri danej hustote bola druhou najtuhšiou vzorkou.

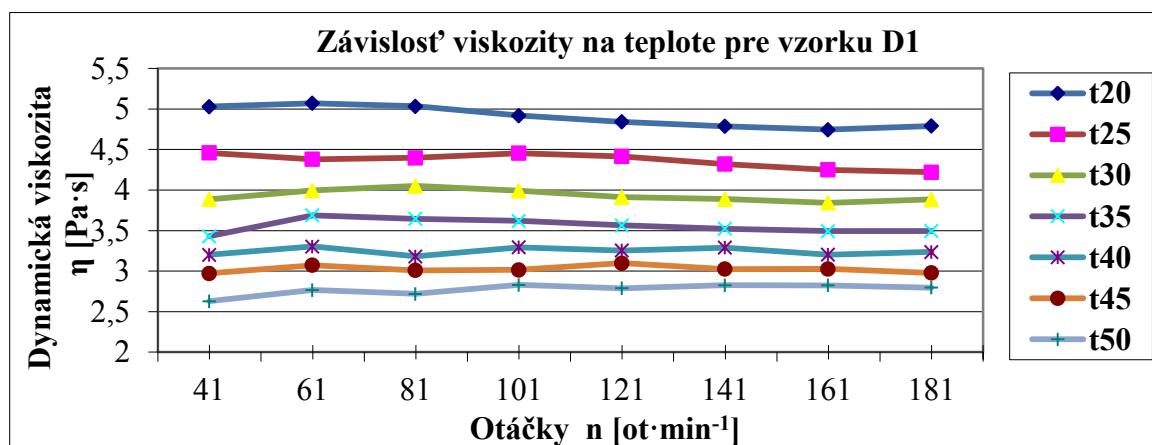
Vzorka C1 nemala, tak výrazne klesanie viskozity v závislosti na teplote ako vzorky D1 a B1, ale podľa grafického vyhotovenia mala klesanie niečo medzi vzorkou A1 a B1.

3.5. Závislosť vzoriek na teplote

Pre všetkých 12 vzoriek vykreslíme grafickú závislosť, ktorá sa vykonávala na teplotnom rozsahu od 20°C do 50°C v rozsahu otáčok od 41 do 181 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. V práci vykreslím len vzorku D (D1, D2, D3), ktorá je pre všetky hustoty. Ostatné vzorky A, B, C budú priložené v prílohe.

Závislosť vzorky D1 na teplote

Hustota vzorky D1 bola $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



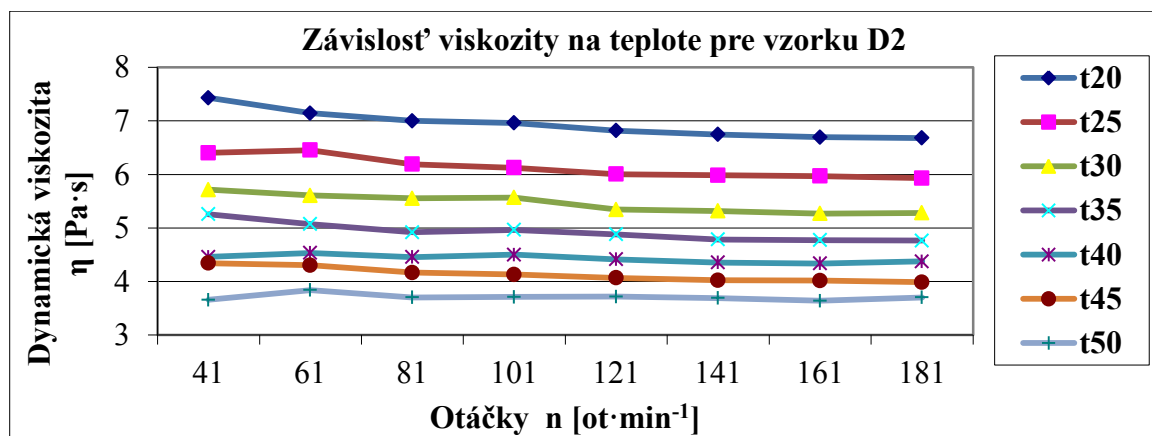
Obr.25 Závislosť nameranej vzorky D1 na teplote

Zhodnotenie:

Viskozita kvapaliny pri jej ohrievaní klesala. Pri každom ohriati kvapaliny o 5°C a celom rozsahu otáčok klesala viskozita skoro konštantne o rovnakú hodnotu.

Závislosť vzorky D2 na teplote

Hustota vzorky D2 bola $\rho = 1016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



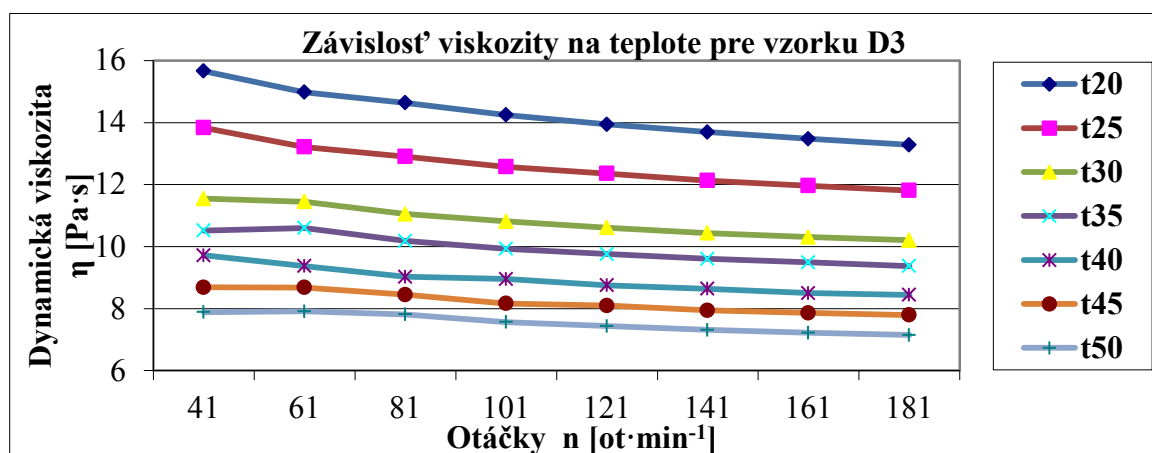
Obr.26 Závislosť nameranej vzorky D2 na teplote

Zhodnotenie:

Pri teplotách od 20 do 35°C viskozity výrazne klesala. Pre vyššie teploty od 40°C do 50°C už zmena viskozity tak výrazna nebola.

Závislosť vzorky D3 na teplote

Hustota vzorky D3 bola $\rho=1028 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.



Obr.27 Závislosť nameranej vzorky D3 na teplote

Vzorka D3 bola veľmi závislá na teplote a pri každej zmene teploty jej viskozita klesala.

4. Meranie v závislosti na iných parametroch

Vyhodnotenie merania na iných parametroch

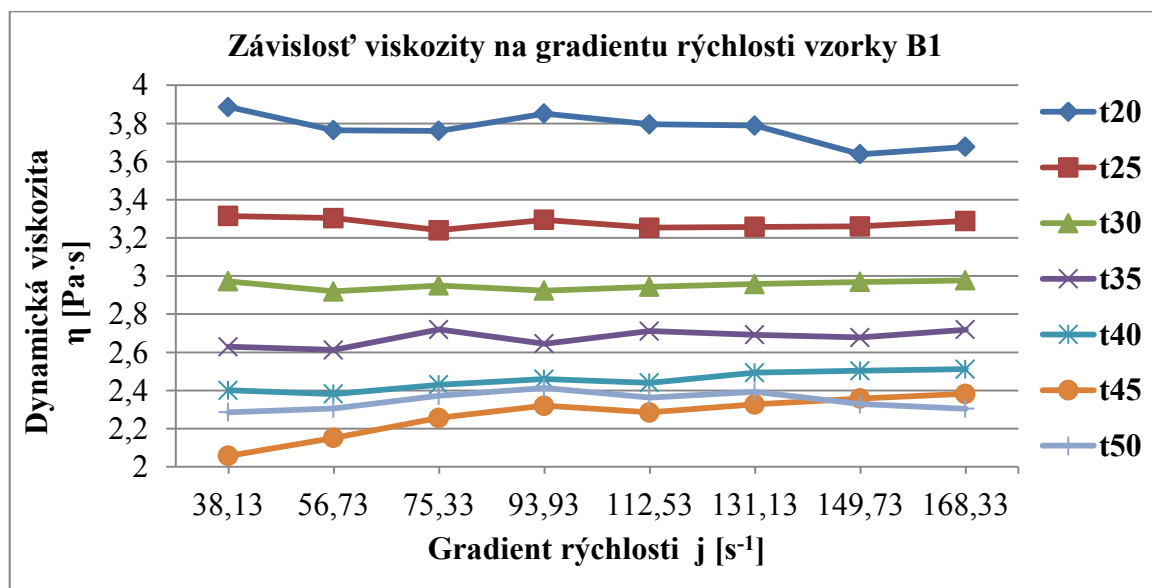
Vyhodnotením merania vykonávame nameraných vlastností vzorky v porovnaní s inými parametrami. Porovnávanie je vykonané na závislosti viskozity na teplote, otáčkach, gradientu rýchlosti a i.

Budeme porovnávať najmä vzorky skupiny B a D. Vzorky B sú momentálne používané vo firme dodávateľa a vzorky D sú nové vzorky, ktoré začína dodávateľ používať.

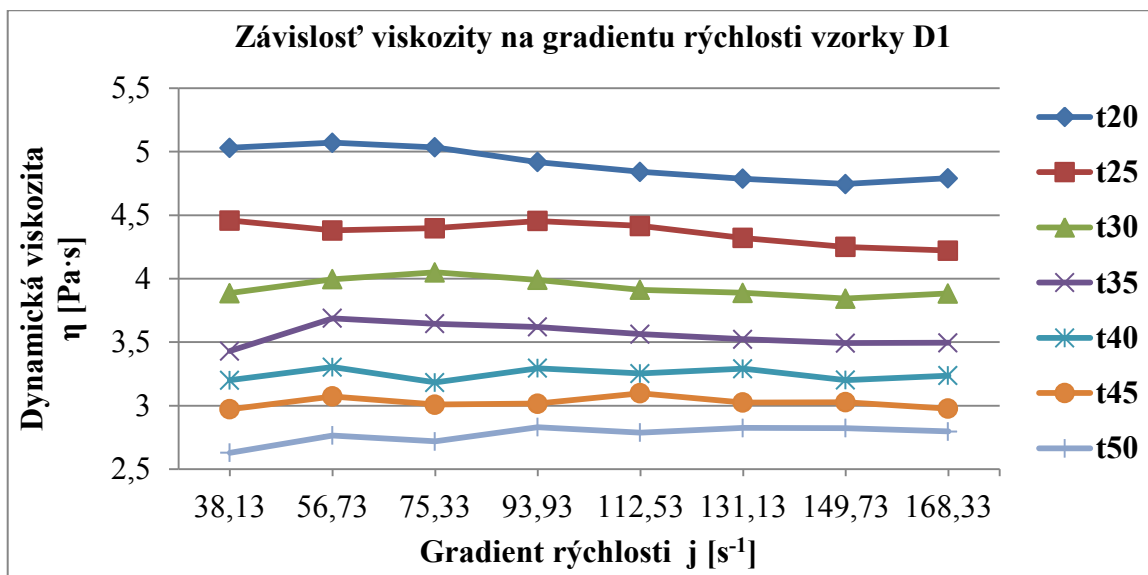
4.1. Závislosť na gradientu rýchlosti

Závislosť viskozity na gradientu rýchlosti (označená „shear rate” pri nameraných hodnotách) sme vykonávali pre všetky vzorky B a D pri rozsahu teplôt 20°C do 50°C. Grafy pre vzorky s hustotou $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ vytvoríme grafickú závislosť. Grafy vzoriek pre hustoty $\rho = 1016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a $\rho = 1028 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ sú prídelené v prílohách.

Grafická závislosť viskozity na gradientu rýchlosti



Obr.28 Závislosť viskozity vzorky B1 na gradientu rýchlosti



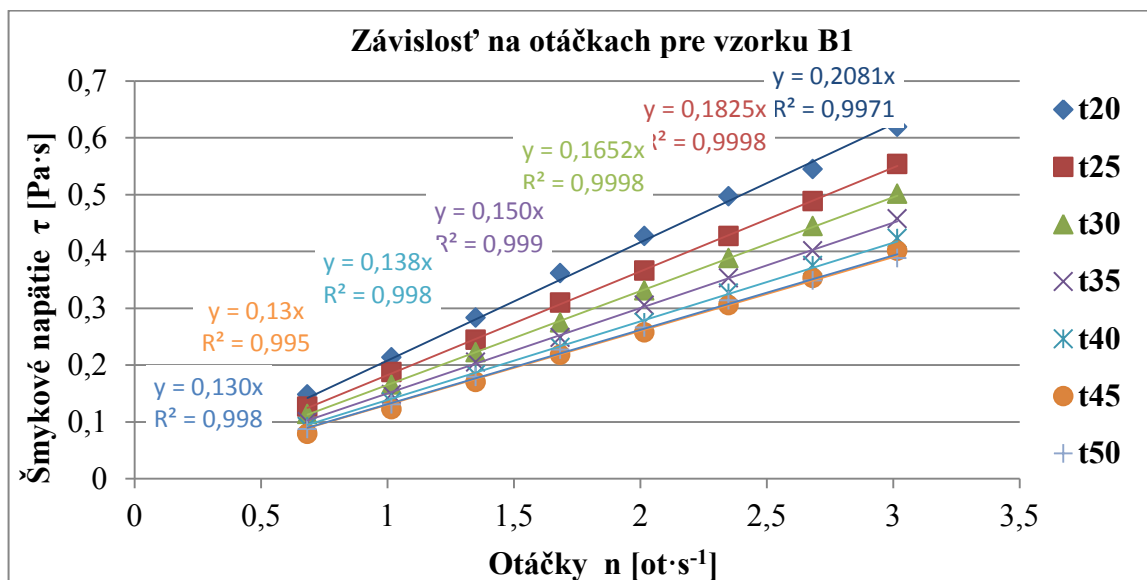
Obr.29 Závislosť viskozity vzorky D1 na gradientu rýchlosti

4.2. Závislosť na otáčkach

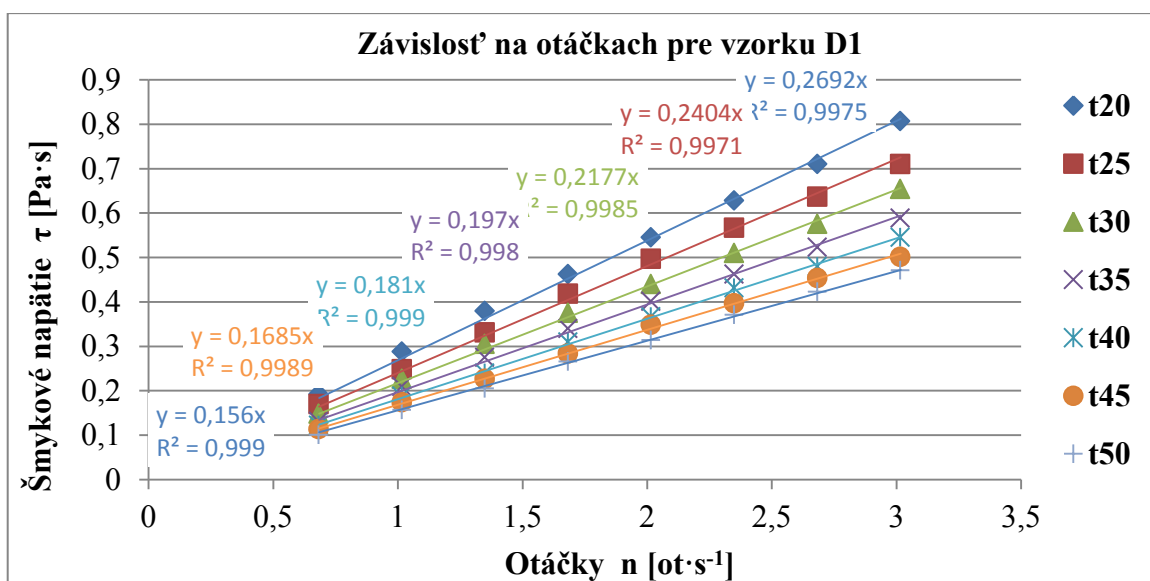
Výpočet dynamickej viskozity sa prevádzal v závislosti nameraných hodnôt šmykového napätia na otáčkach, ktoré sme naniesli do grafu. Namerané otáčky mali základnú jednotku $[ot \cdot min^{-1}]$, ktorú sme pre výpočet previedli na jednotku $[ot \cdot s^{-1}]$. Nanesené hodnoty v grafe sme preložili krivkou – lineárnou závislosťou a je určená hodnotou spoľahlivosti R^2 [Obr.28]. Konštanta lineárnej rovnice „ α “ určuje hodnotu dynamickej viskozity podľa vzťahu (19). Hodnota dynamickej viskozity sa určuje podľa uhlu naklonenia tokovej krivky. Hodnoty vzorky B a D pre hustotu $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ zadáme do tabuľky a nanesieme do grafu. Tabuľky a hustoty pre ostatné hustoty uvediem v prílohe.

$$\eta = tg\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (19)$$

Lineárna závislosť šmykového napätia na otáčkach vzoriek B a D pre $\rho = 1010 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$



Obr.30 Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti B1



Obr.31 Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti D1

V tabuľke nameraných hodnôt je pre každú teplotu „t“ vyjadrená hodnota dynamickej viskozity „ α “ nameraná dynamická viskozita „ η_{vyp} “, vypočítaná dynamická viskozita „ η_{vyp} “ a premena jednotiek vypočítanej viskozity „ η_{prem} “. [tab. 2]

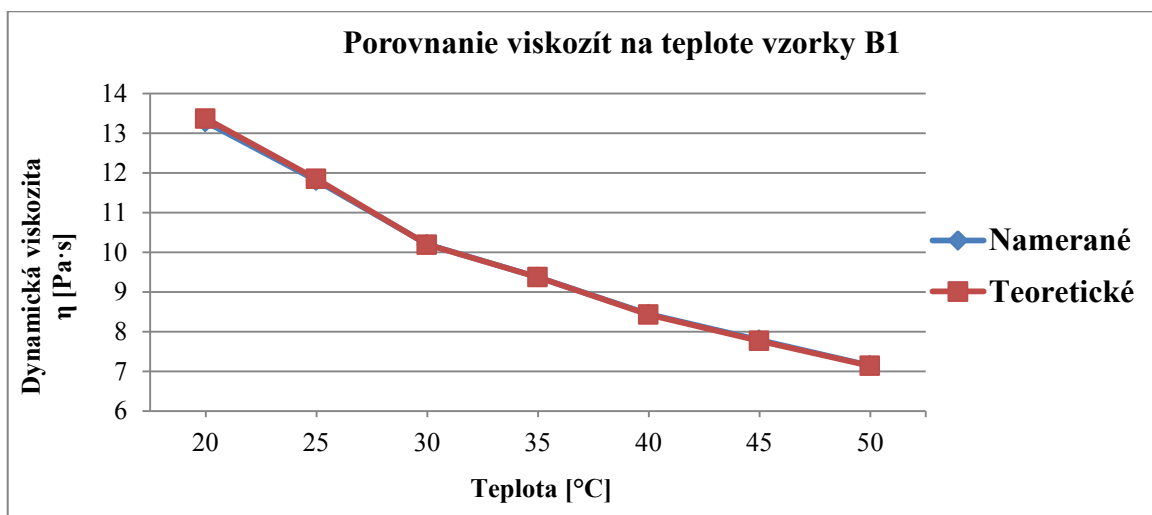
Tab.2 Hodnoty pre závislosť na otáčkach vzorky B1

$t [^{\circ}\text{C}]$	20	25	30	35	40	45	50
α	0,208	0,182	0,165	0,15	0,138	0,13	0,13
$\eta_{nam}[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	3,676	3,288	2,977	2,718	2,511	2,382	2,304
$\eta_{vyp}[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	0,0036	0,0031	0,0028	0,0026	0,0024	0,0022	0,0022
$\eta_{prep}[\text{mPa} \cdot \text{s}]$	3,63	3,177	2,88	2,618	2,409	2,269	2,269

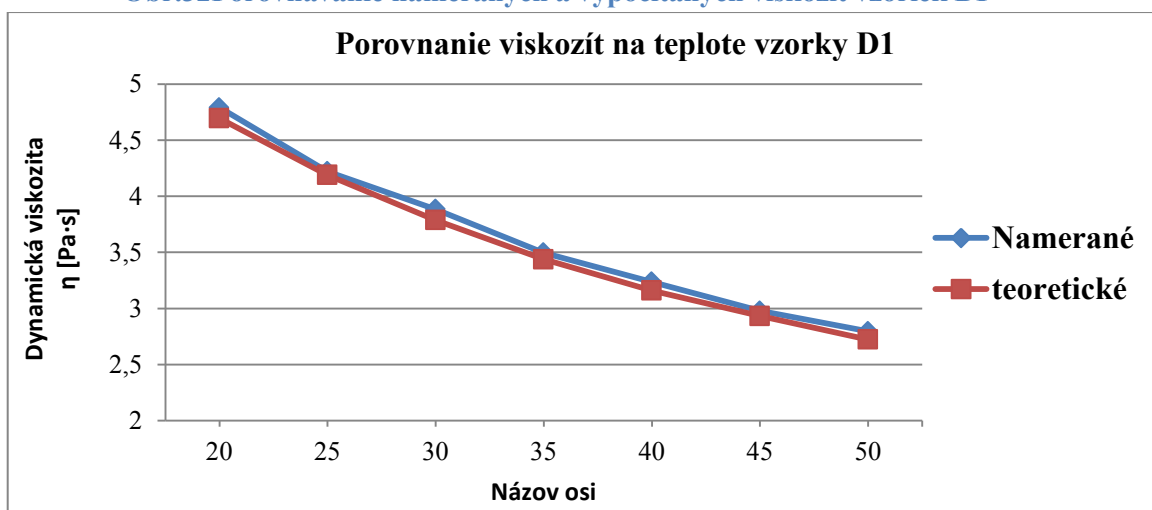
Tab.3 Hodnoty pre závislosť na otáčkach vzorky D1

$t [^{\circ}\text{C}]$	20	25	30	35	40	45	50
α	0,269	0,240	0,217	0,197	0,181	0,168	0,156
$\eta_{nam}[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	4,79	4,22	3,884	3,495	3,23	2,978	2,796
$\eta_{vyp}[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	0,0046	0,0041	0,0037	0,0034	0,0031	0,0029	0,0027
$\eta_{prep}[\text{mPa} \cdot \text{s}]$	4,695	4,189	3,787	3,438	3,159	2,932	2,723

Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity



Obr.32 Porovnávanie nameraných a vypočítaných viskozít vzoriek B1



Obr.33 Porovnávanie nameraných a vypočítaných viskozít vzoriek D1

5. Návod pre meranie

Z dôvodu merania viacerých vzoriek sme použili program B.E.A.V.I.S., kde sme prednastavili meracie ukony a automatický menil parametre potrebné pre meranie (zmena otáčiek na časovom intervale, a i.) [Tab.2]. Jedinú operáciu pri meraní, ktorá sa vykonáva manuálne je zmena teploty. Teplotu sme menili zmačknutím tlačidla na termostate a následným pootočením buď v smere hodinových ručičiek pre ohrievanie meranej vzorky alebo v protismere hodinových ručičiek pre ochladzovanie meranej vzorky. Teplotu v °F môžeme kontrolovať na displeji termostatu a teplotu v °C kontrolujeme v záložke „Dashboard“ program Rheocalc [Obr.23]. Maximálna teplota, na ktorú mohol thermostat zohriať kvapalinu bola 55°C. Maximálne otáčky ktoré mohol reometer vykonať boli do 200 [$ot \cdot min^{-1}$].

Zmačknutie tlačidla pred nastavením teploty slúži ako poistka pred nečenenou zmenou teploty, ktorá môže nastať nechceným obtrením o tlačidlo.

Tab.4 Nastavené parameter pre meranie v programe B.E.A.V.I.S.

Kód príkazu		Požadovaný popis parametrov príkazov
SSN	1	Meranie začne pri rotácii vretena otáčkami $n = 1\text{min}^{-1}$
LSC	9	Počet meracích stupňov (meriací rozsah otáčok je $1\text{--}181\text{min}^{-1}$)
SSI	20	Program zdvihne rýchlosť otáčania o 20min^{-1}
WTI	00:15	Program vyčka pri danej rýchlosti 15 sekúnd, (MM:SS)
DSP		Program zaznamená jednu radu nameraných hodnôt
LEC		Konec meriacého stupňa
LSC	8	Počet meracích stupňov
SSI	(-20)	Program zníži rýchlosť otáčania o $n = 5\text{min}^{-1}$
WTI	00:15	Program vyčka pri danej rýchlosti 15 sekúnd, (MM:SS)

Meranie zadaných vzoriek bolo z časového hľadiska zdĺhavé. Hlavnou príčinou zdĺhavého merania bolo dlhé ochladzovanie cirkulujúcej vody z 50°C späť na štartovaciu teplotu merania 20°C . Ďalšími zdĺhavými faktormi boli nastavenia v programe B.E.A.V.I.S. ako nastavená doba vyčkávania pri daných otáčkach WTI (15 sec) a i.

6. Záver

Bakalárska práca sa zaoberala meraním závislosti dvanástich vzoriek so zmesou grafitu rozdelených do 4 skupín s 3 rôznymi hustotami. Následne som popísal vlastnosti dynamickej a kinematickej viskozity, rozdelenie Newtonovských a Nenewtonovských kvapalín. Práca obsahuje spôsoby merania viskozity kvapalín pomocou rôznych viskozimetrov. Znázornil som grafické závislosti viskozity na teplote, tlaku a dobe používania.

Meral som závislosť viskozity zadaných vzoriek na teplote pomocou rotačného reometra LVDV-II+PRO od firmy Brookfield, ktorý ma k dispozícii naša katedra. Reometer a jeho diely sú graficky znázornené na [Obr.21]. Súčasťou zariadenia boli termostat, ktorý slúžil na ohrievanie alebo ochladzovanie kvapaliny a počítač, ktorého súčasťou bol program Rheocalc [Obr.20]. Do rheocalcu sme vložili nadefinované hodnoty pre meranie pomocou programu B.E.A.V.I.S., ktorého funkcie sú popísané na [Tab.4].

Pre všetky hustoty vzorky D boli výraznejšie závisle na teplote než ostatné vzorky a zároveň boli najtuhšími spomedzi všetkých vzoriek. Pri porovnaní vzoriek B a D som zistil, že vzorky D sú na teplote závislejšie a preto strácajú mazaciu účinnosť.

Závislosť na gradientu rýchlosti som vykonal pre rozsah teplôt od 20°C do 50°C. Pri tejto závislosti sa hodnota viskozity výrazne nelišila. Medzi nameranými hodnotami bol gradient rýchlosti označený „Shear rate”.

Pri porovnávaní teoretickej (vypočítanej) a nameranej viskozity v závislosti šmykového napätia na otáčkach sme porovnávali pri rozsahu teplôt od 20°C do 50°C. Teoretické hodnoty sme určili pomocou lineárnej závislosti tokových kriviek, ktoré vyjadrujú hodnotu dynamickej viskozity.

7. Zoznam použitej literatúry

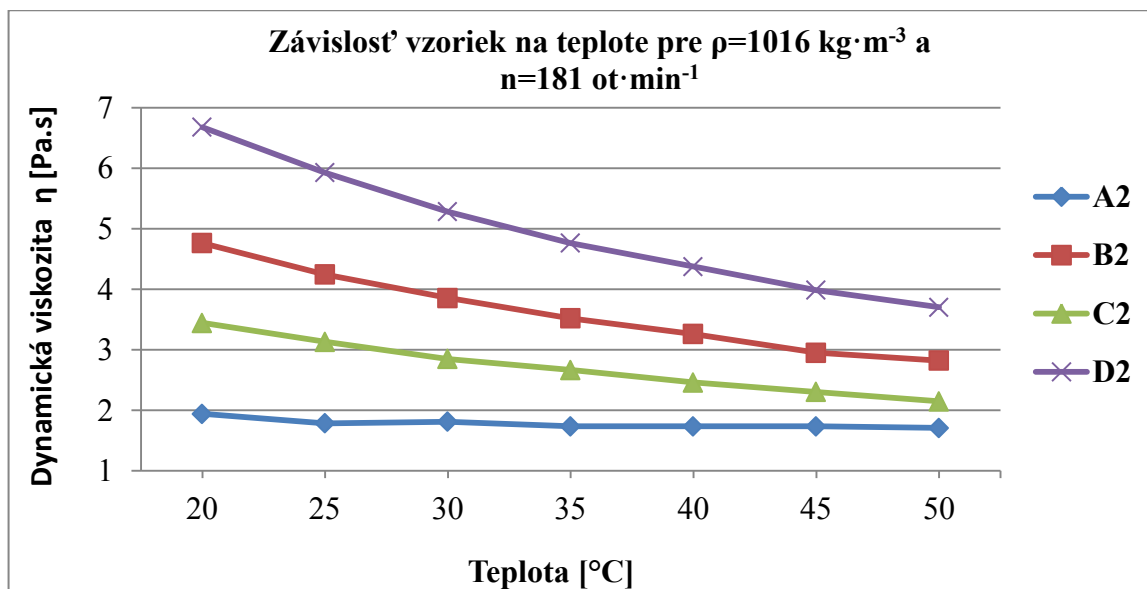
- [1] Dvořák, L.: *Vlastnosti tekutin*. [2013-03-07] Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>
- [2] Janalík, J.: *Viskozita tekutin a její měření*. [2013-03-12] Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>
- [3] Pokopcová, A.: *Viskozitné a reologické merania roztokov hyaluronanu*. [2013-03-13] Dostupné z WWW: <http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14243/pokopcov%C3%A1_2010_dp.pdf?sequence=1>
- [4] Reologie a reometrie kvapalin. [2013-04-27] Dostupné z WWW: <kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>
- [5] NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha. SNTL Praha, 1987. 354 s.
- [6] KOZUBKOVÁ, M. *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní cvičení*. [2013-05-05] Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>
- [7] Brookfield : *Engineering laboratories*. [2013-03-11] Dostupné z WWW: <<http://www.brookfieldengineering.com/education/what-is-viscosity.asp#viscosity>>
- [8] Západočeská Univerzita v Plzni. [2013-03-27] Dostupné z WWW: <http://www.kme.zcu.cz/granty/biofrvs/pdf/4-01FRVS-03.pdf>
- [9] Wikiskripta : *Viskozita*. [2013-04-28] Dostupné z WWW: <<http://www.wikiskripta.eu/index.php/Viskozita>>
- [10] The engineering toolbox. [2013-03-17] Dostupné z WWW: http://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-absolute-kinematic-viscosity-d_412.html
- [11] Ústav fyziky a materialového inženýrství. [2013-04-11] Dostupné z WWW: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_03.pdf
- [12] Wikipedia. [2013-03-17] Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Hagen%E2%80%93Poiseuille_equation
- [13] Advanced Analytical Instrumentation for Lab and Process Applications http://www.paclp.com/Lab_Instruments/Brand/Cambridge%20Viscosity
- [14] Dashofer. [2013-04-29] Dostupné z WWW: <http://www.dashofer.cz/download/pdf/stp/5_hydromechanika.pdf?wa=WWW13IX>

- [15] Fisher : *Laboratorna technika*. [2013-04-29] Dostupné z WWW:
<<http://www.fisherww.sk/>
- [16] Vysoké učení technické v Brně. [2013-04-28] Dostupné z WWW:
https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/16347/kotrlovaj_BP.pdf?sequence=1
- [17] Brookfield : *Manual of viscosimeter*. 65 s.
- [18] DOBEŠ, J. *Měření tokových křivek plastických maziv*, Ostrava, VŠB – TUO, 2010, 50 s.

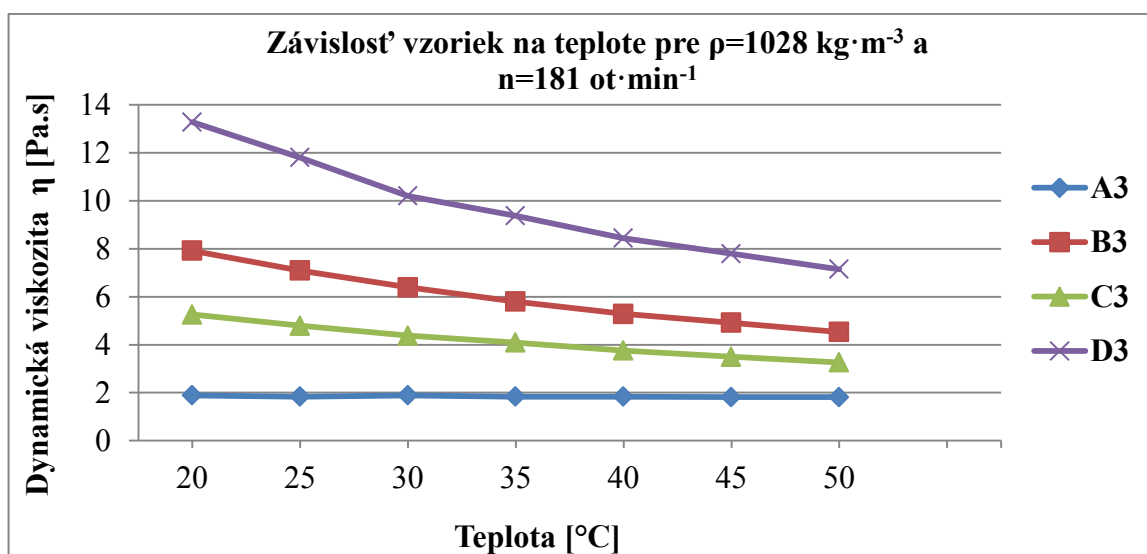
8. Zoznám príloh

Príloha 1	Závislosť nameraných vzoriek na teplote pre hustotu $\rho = 1016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	47
Príloha 2	Závislosť nameraných vzoriek na teplote pre hustotu $\rho = 1016 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	47
Príloha 3	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku B1	48
Príloha 4	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku B2	48
Príloha 5	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku B3	48
Príloha 6	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku C1	49
Príloha 7	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku C2	49
Príloha 8	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku C3	49
Príloha 9	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku A1	50
Príloha 10	Závislosť viskozity na teplote pre vzorku A2	50
Príloha 11	Závislosť viskozity vzorky B2 na gradientu rýchlosti	50
Príloha 12	Závislosť viskozity vzorky B2 na gradientu rýchlosti	51
Príloha 13	Závislosť viskozity vzorky D2 na gradientu rýchlosti	51
Príloha 14	Závislosť viskozity vzorky B3 na gradientu rýchlosti	52
Príloha 15	Závislosť viskozity vzorky B3 na gradientu rýchlosti	52
Príloha 16	Lineárna závislosť šmykového napätia na otáčkach vzorky B2.....	53
Príloha 17	Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na otáčkach vzorky B2.....	53
Príloha 18	Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky B2	53
Príloha 19	Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti D2.....	54
Príloha 20	Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na otáčkach vzorky D2	54
Príloha 21	Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky D2	54
Príloha 22	Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti B3	55
Príloha 23	Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na otáčkach vzorky B3.....	55
Príloha 24	Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky B3.....	55
Príloha 25	Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti D3.....	56
Príloha 26	Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na otáčkach vzorky D3	56
Príloha 27	Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky D3	56

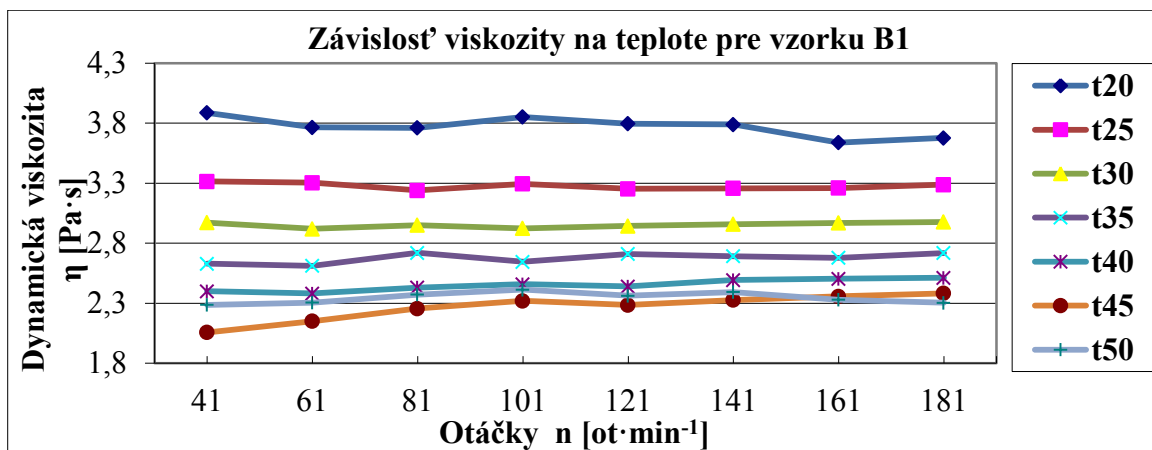
9. Prílohy



Príloha 1 Závislosť nameraných vzoriek na teplote pre hustotu $\rho = 1016 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

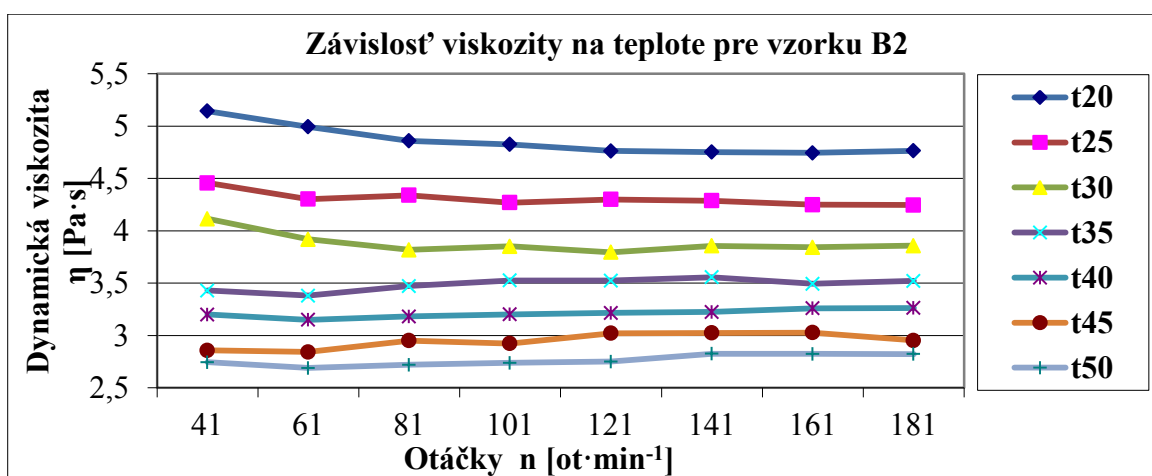


Príloha 2 Závislosť nameraných vzoriek na teplote pre hustotu $\rho = 1016 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$



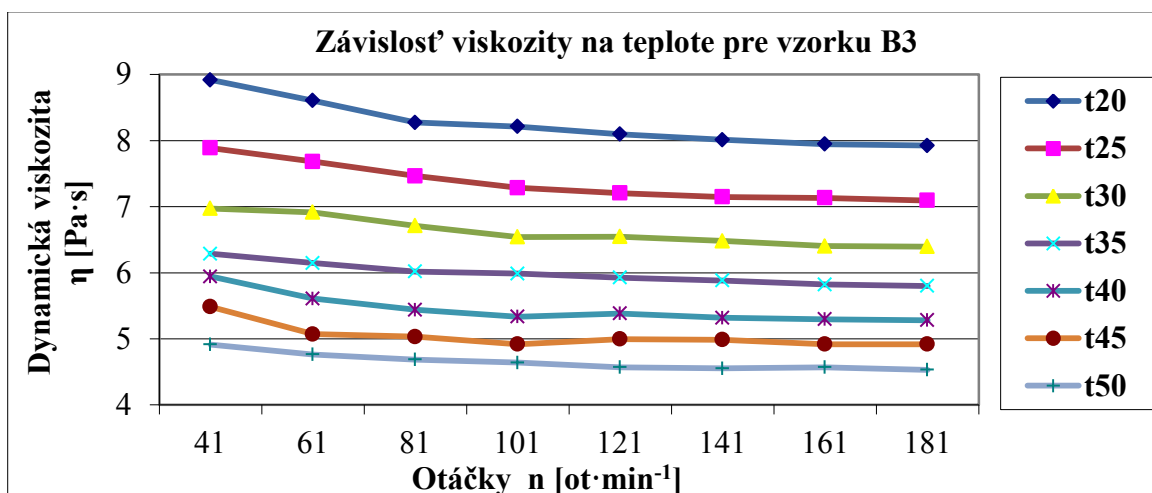
Príloha 3

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku B1



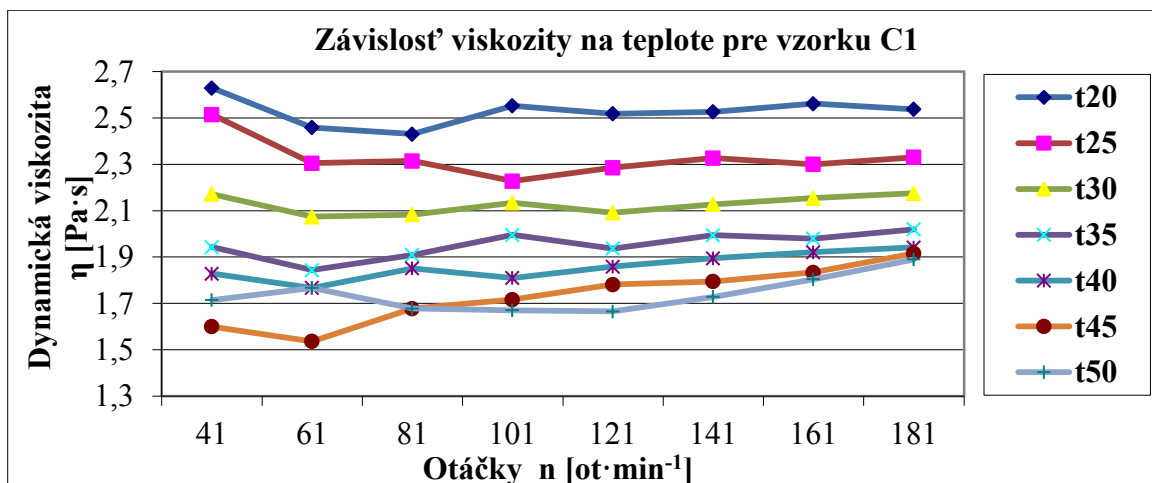
Príloha 4

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku B2



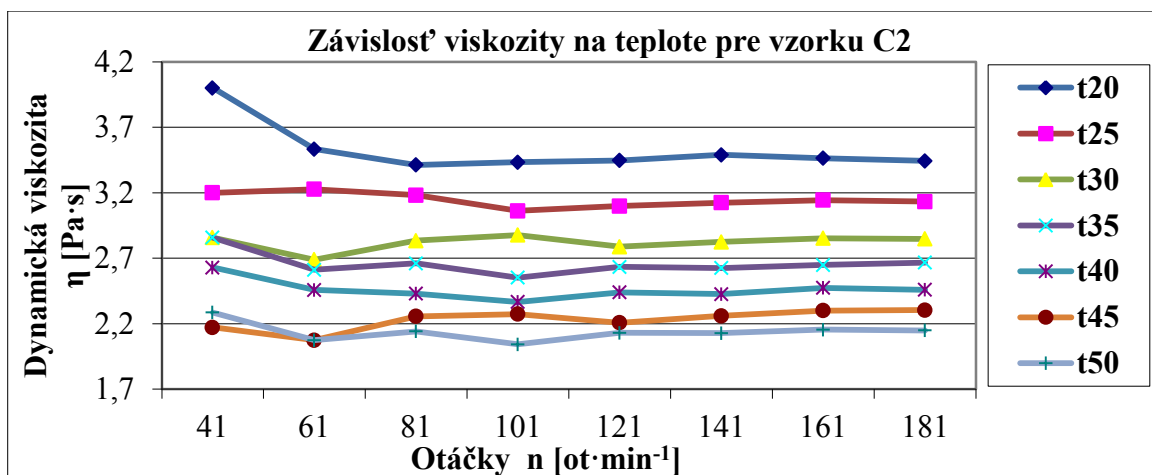
Príloha 5

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku B3



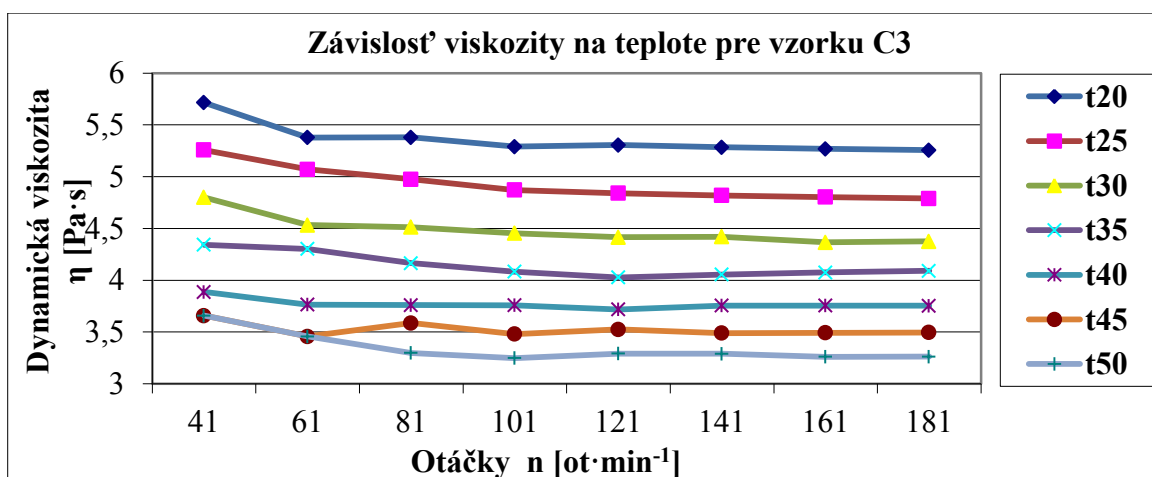
Príloha 6

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku C1



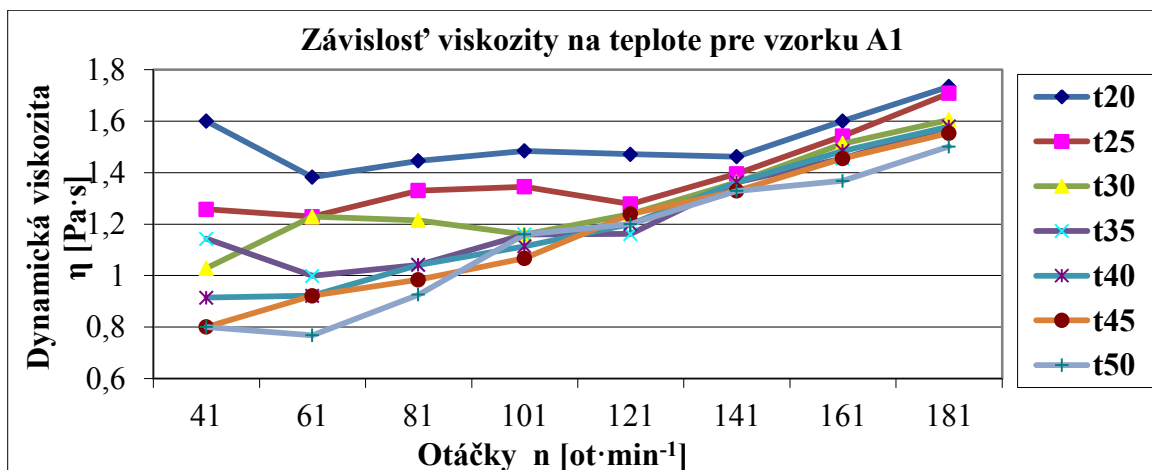
Príloha 7

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku C2



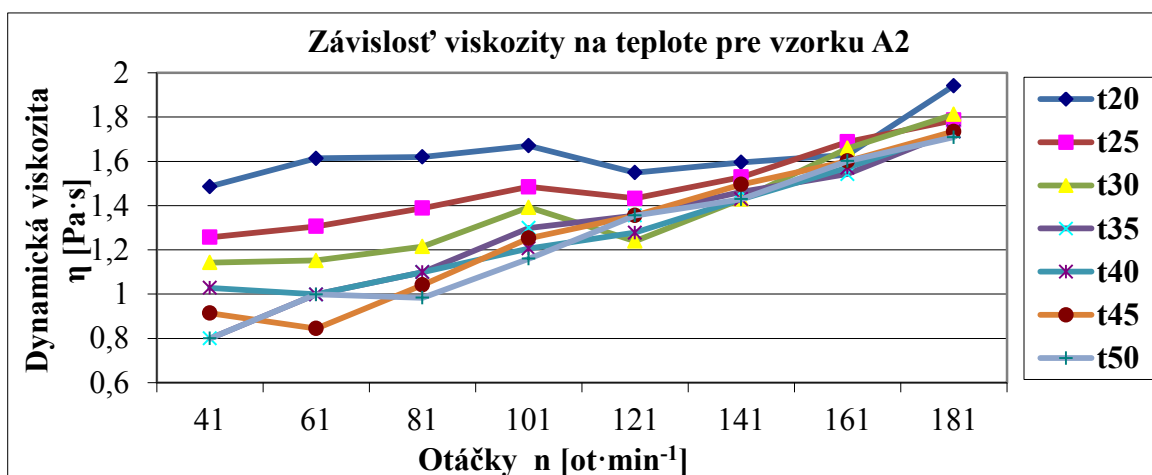
Príloha 8

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku C3



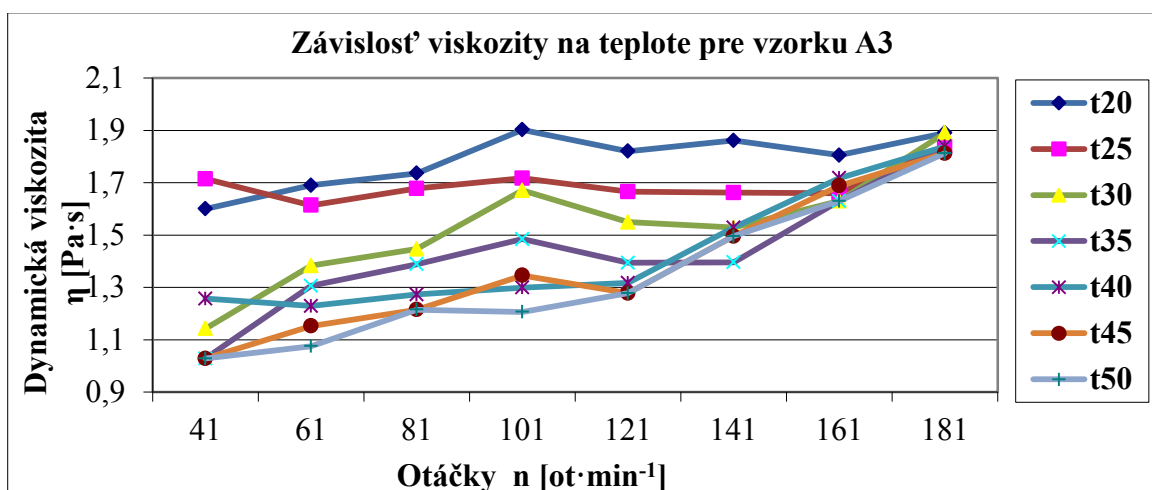
Príloha 9

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku A1



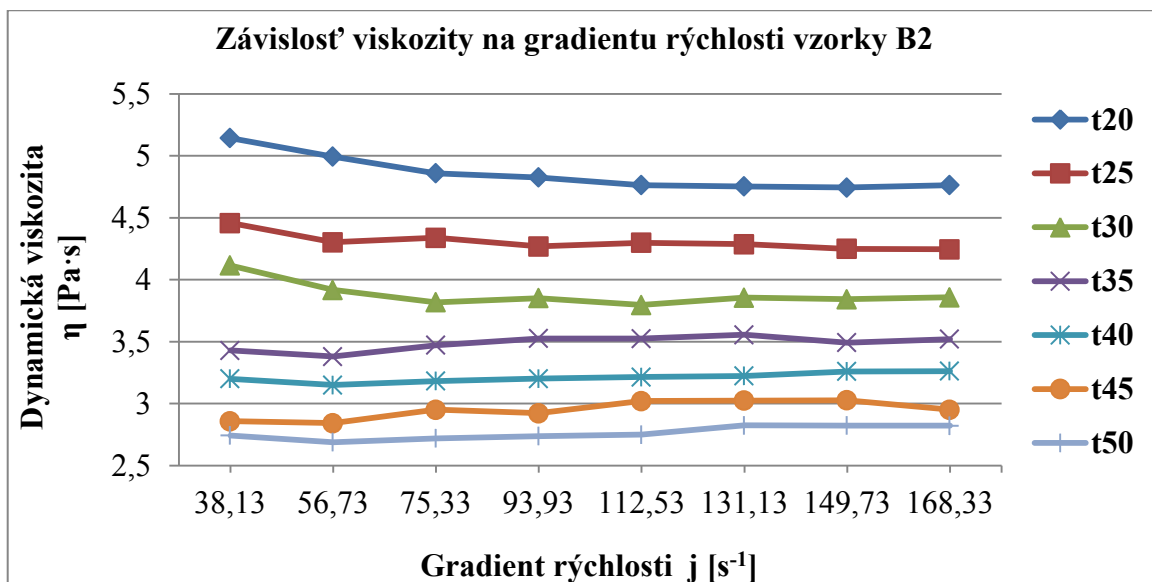
Príloha 10

Závislosť viskozity na teplote pre vzorku A2



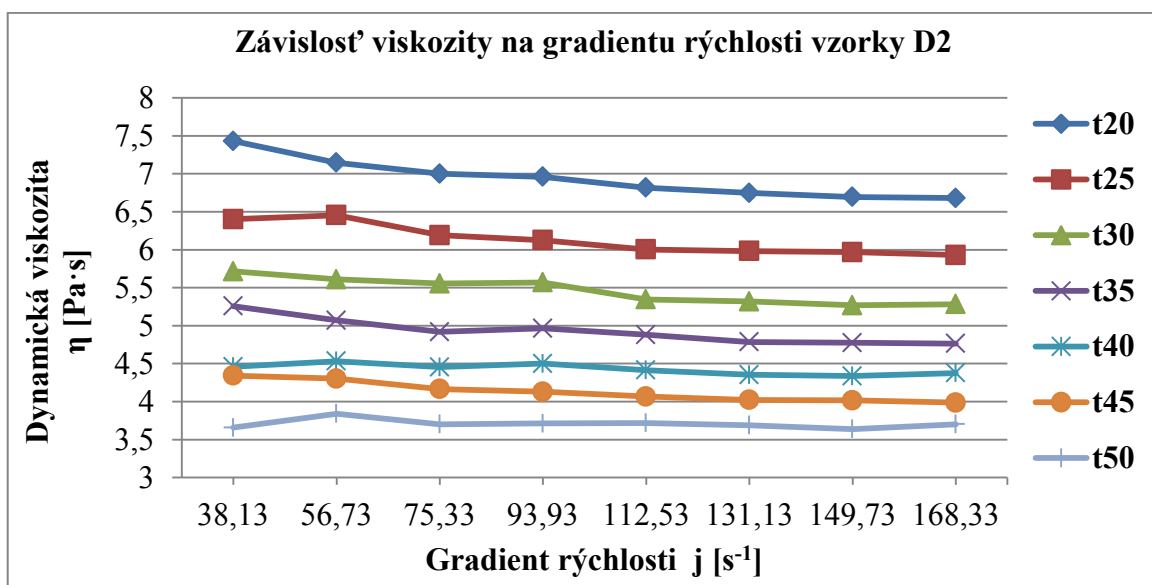
Príloha 11

Závislosť viskozity vzorky B2 na gradientu rýchlosti



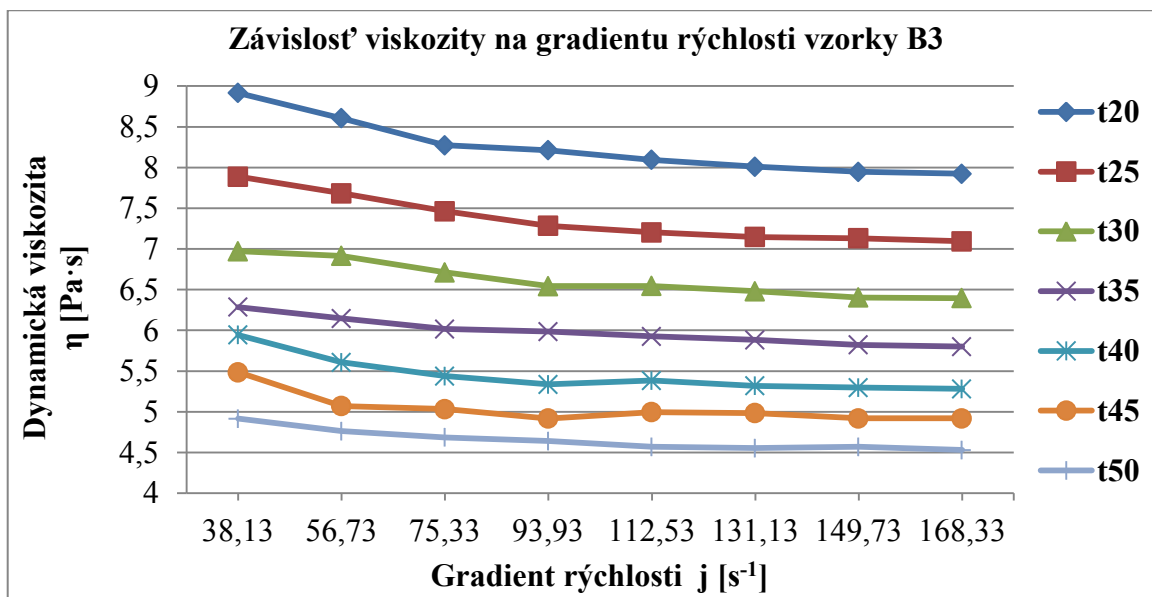
Príloha 12

Závislost' viskozity vzorky B2 na gradientu rychlosti



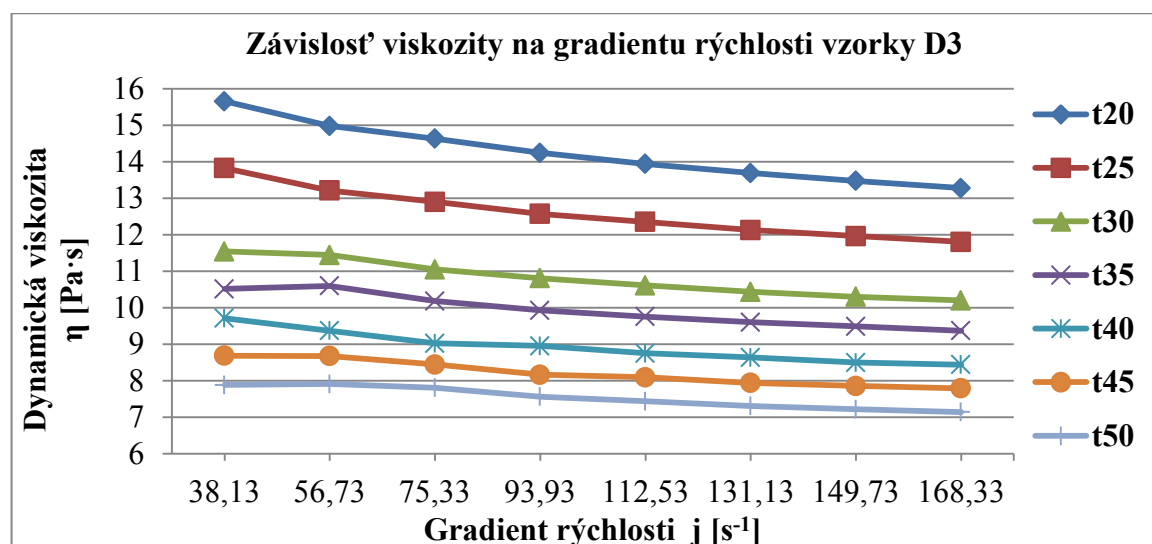
Príloha 13

Závislost' viskozity vzorky D2 na gradientu rychlosti



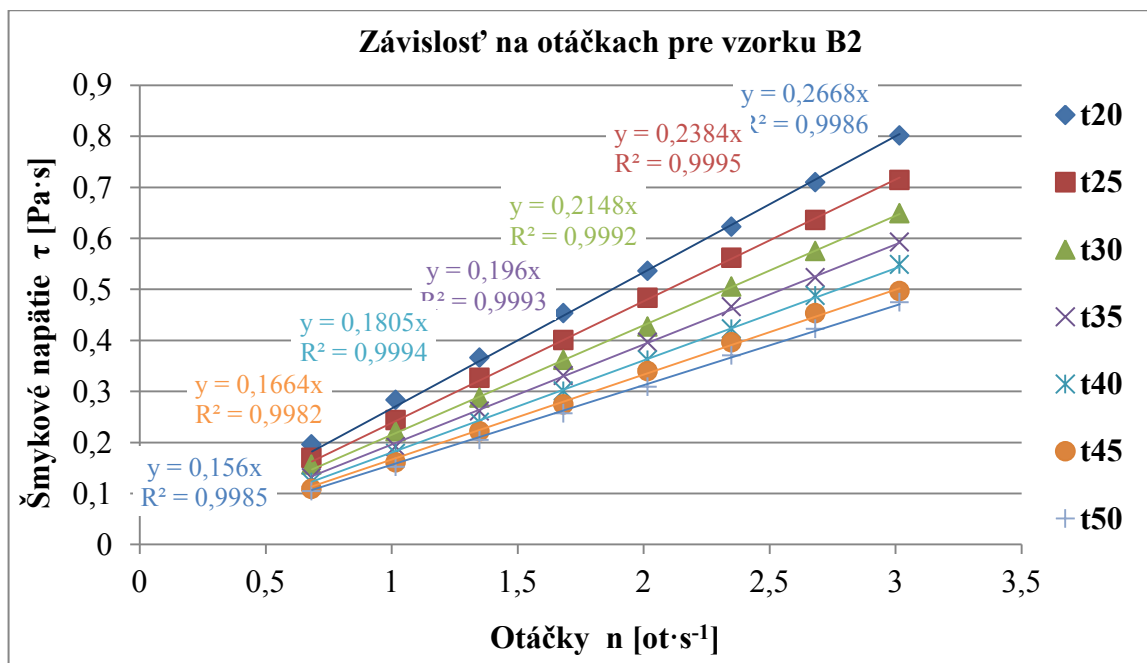
Príloha 14

Závislost' viskozity vzorky B3 na gradientu rychlosti



Príloha 15

Závislost' viskozity vzorky B3 na gradientu rychlosti

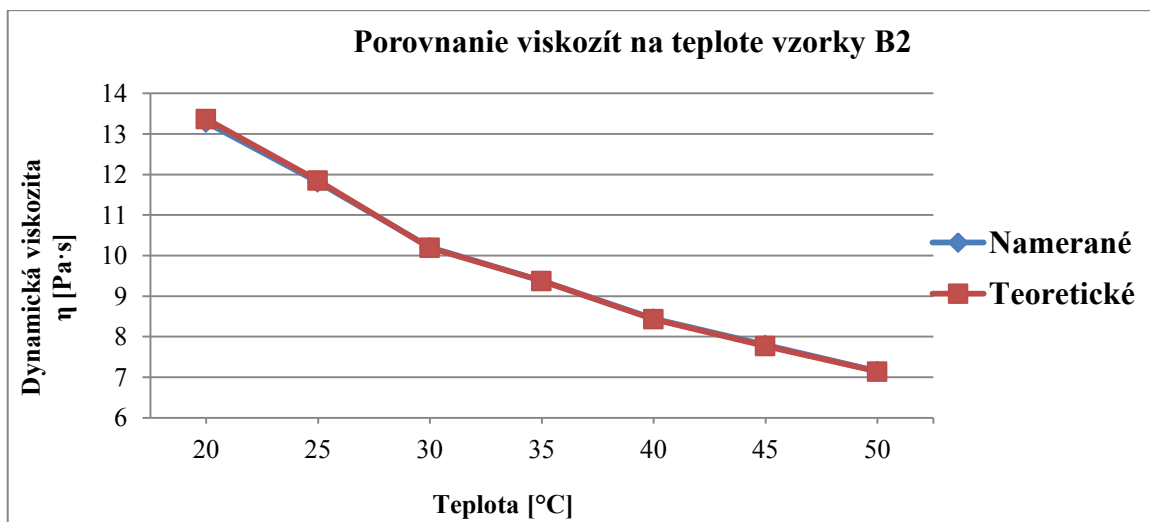


Príloha 16

Lineárna závislosť šmykového napätia na otáčkach vzorky B2

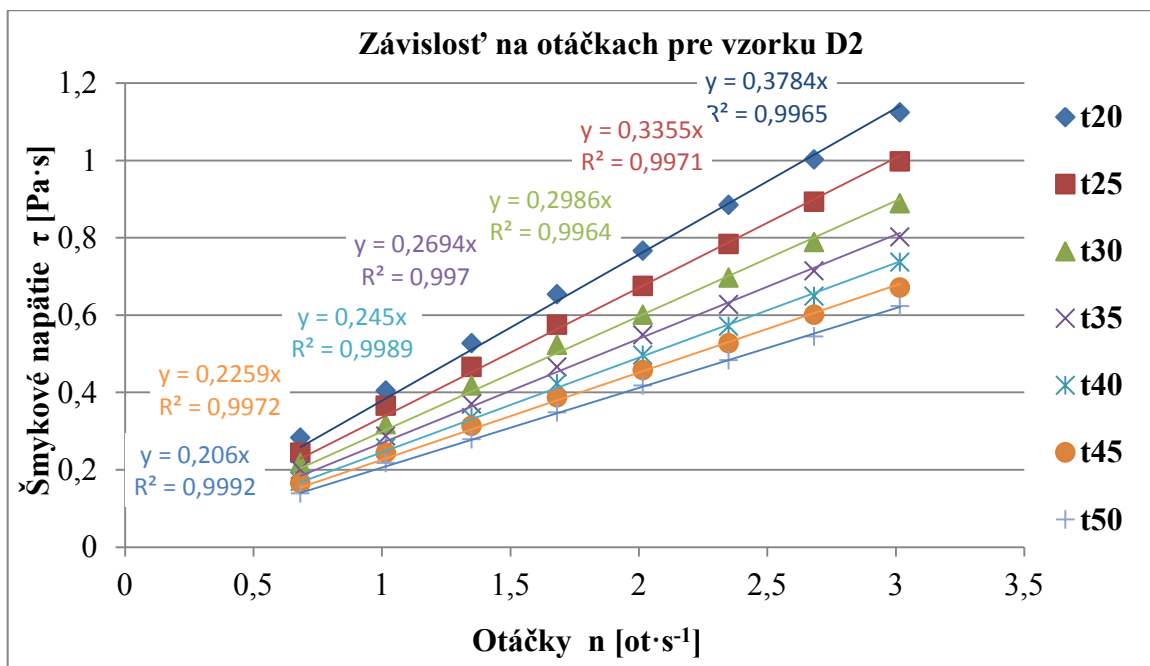
Príloha 17 Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na otáčkach vzorky B2

t [°C]	20	25	30	35	40	45	50
α	0,266	0,238	0,214	0,196	0,180	0,166	0,156
η_{nam} [Pa · s]	4,764	4,246	3,858	3,521	3,262	2,952	2,822
η_{vyp} [Pa · s]	0,0046	0,0041	0,0037	0,0034	0,0031	0,0028	0,0027
η_{prep} [mPa · s]	4,643	4,154	3,735	3,421	3,142	2,897	2,723



Príloha 18

Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky B2

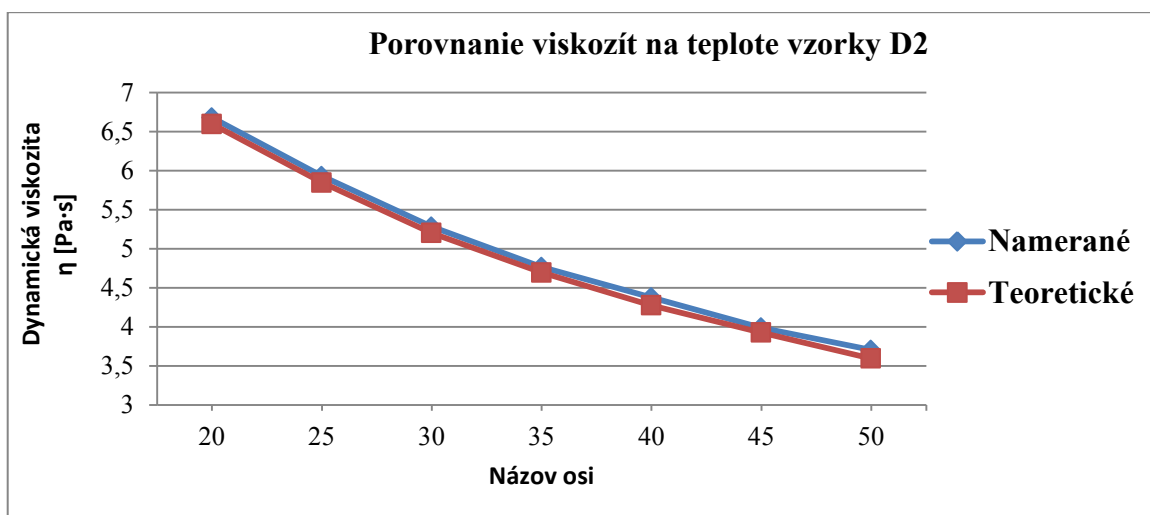


Príloha 19

Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti D2

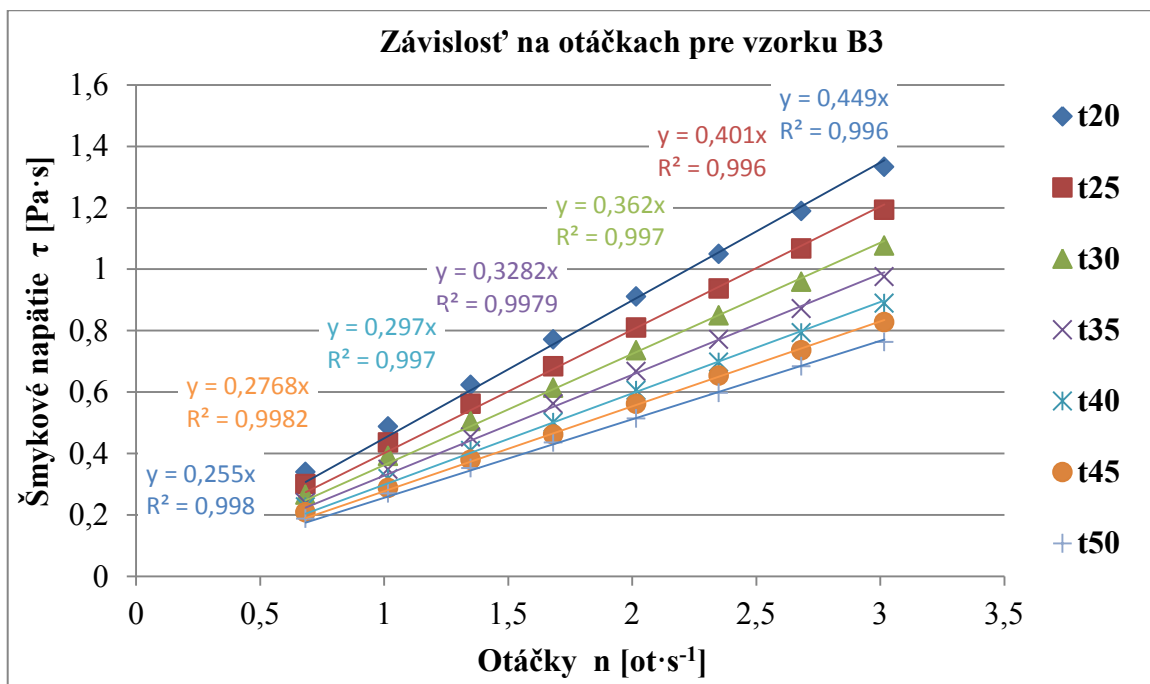
Príloha 20 Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na otáčkach vzorky D2

t [°C]	20	25	30	35	40	45	50
α	0,378	0,335	0,298	0,269	0,245	0,225	0,206
η_{nam} [Pa · s]	6,680	5,928	5,282	4,764	4,376	3,987	3,702
η_{vyp} [Pa · s]	0,0065	0,0058	0,0052	0,0046	0,0042	0,0039	0,0035
η_{prep} [mPa · s]	6,597	5,847	5,201	4,695	4,276	3,927	3,595



Príloha 21

Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky D2



Príloha 22

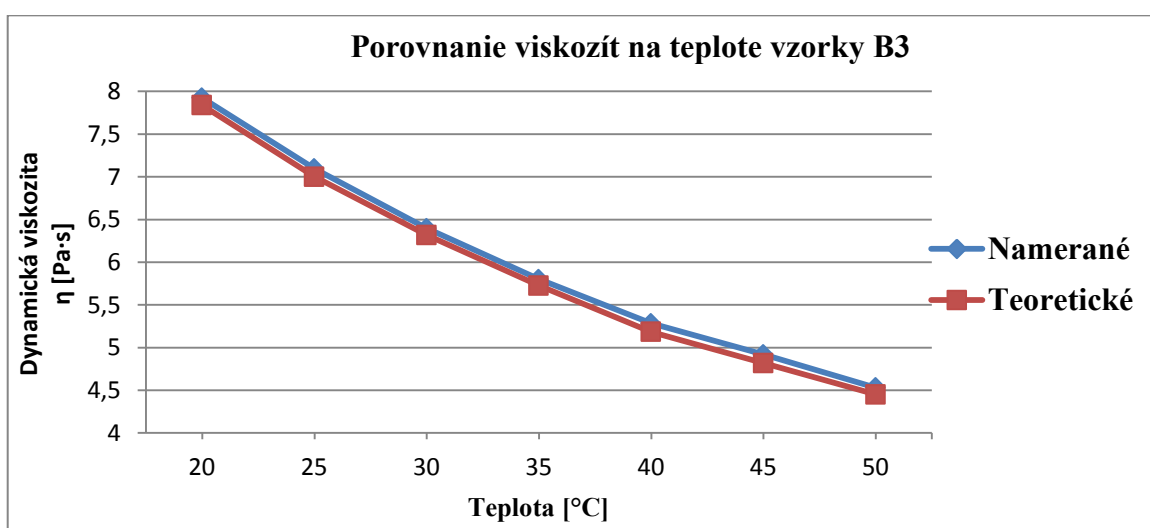
Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti B3

Príloha 23

Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na

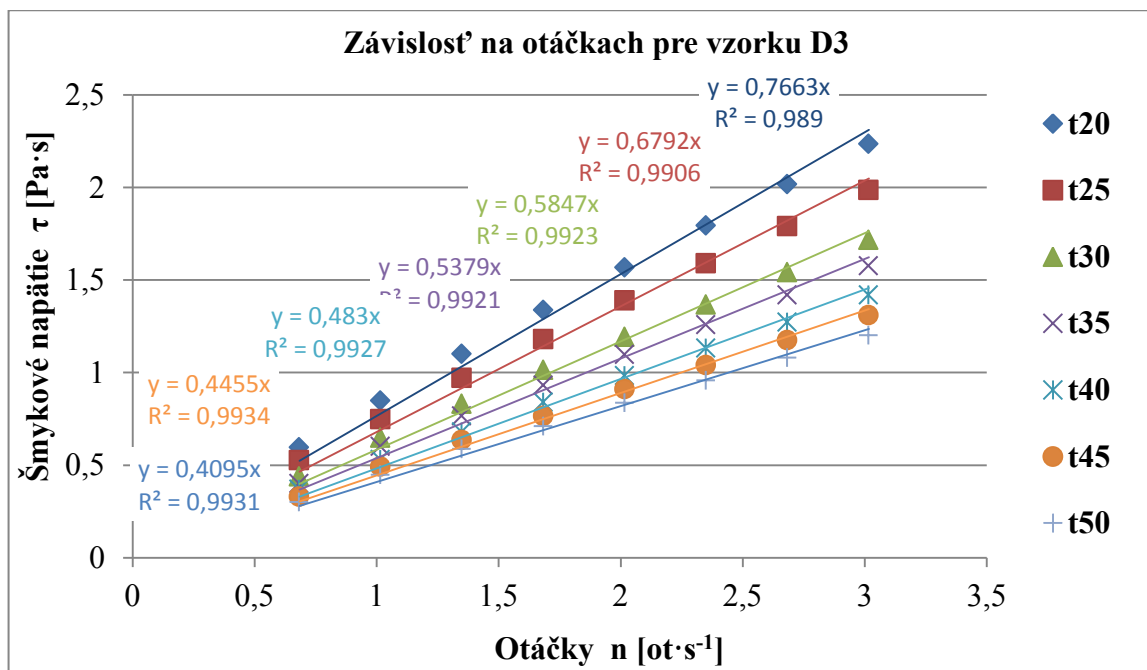
otáčkach vzorky B3

t [°C]	20	25	30	35	40	45	50
α	0,449	0,401	0,362	0,328	0,297	0,276	0,255
η_{nam} [Pa · s]	7,923	7,094	6,395	5,80	5,282	4,919	4,531
η_{vyp} [Pa · s]	0,0078	0,0069	0,0063	0,0057	0,0051	0,0048	0,0044
η_{prep} [mPa · s]	7,837	6,999	6,318	5,725	5,184	4,817	4,451



Príloha 24

Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky B3



Príloha 25

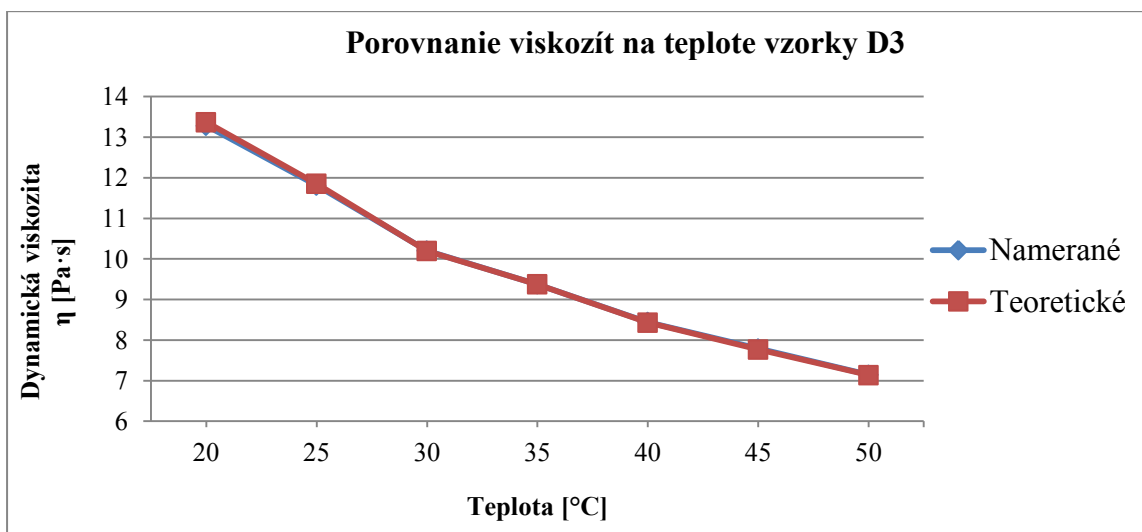
Toková krivka šmykového napätia na otáčkach rýchlosti D3

Príloha 26

Hodnoty nameranej a vypočítanej viskozity pre závislosť na

otáčkach vzorky D3

t [°C]	20	25	30	35	40	45	50
α	0,776	0,679	0,584	0,537	0,483	0,445	0,409
$\eta_{nam}[Pa \cdot s]$	13,282	11,807	10,201	9,373	8,441	7,794	7,146
$\eta_{vyp}[Pa \cdot s]$	0,0133	0,0118	0,0101	0,0093	0,0084	0,0077	0,0071
$\eta_{prep}[mPa \cdot s]$	13,37	11,851	10,193	9,373	8,43	7,767	7,139



Príloha 27

Porovnanie nameranej a teoretickej (vypočítanej) viskozity vzorky D3